



Universidad
Carlos III de Madrid

Proyecto Final de Carrera

Departamento de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Industrial

**Diseño y cálculo del sistema de
refrigeración de una antena de
aplicación aeronáutica**

AUTOR: Andrés Javier Ortiz Soriano

TUTOR: D. Higinio Rubio Alonso

Leganés, Abril de 2011

Título: Diseño y cálculo del sistema de refrigeración de una antena de aplicación aeronáutica

Autor: Andrés Javier Ortiz Soriano

Director: D. Higinio Rubio Alonso

EL TRIBUNAL

Presidente: _____

Vocal: _____

Secretario: _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día ___ de _____ de 20__ en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

El presente documento se trata del proyecto de final de carrera correspondiente a los estudios de Ingeniería Industrial impartidos por la Universidad Carlos III de Madrid (www.uc3m.es) en el campus de Leganés.

Es a esta institución y a todo el personal que la compone a quienes quiero dedicar mis primeras palabras que ya a todos ellos debo la educación y los conocimientos que he recibido y que me han permitido desarrollar el presente proyecto y, al mismo tiempo, abrirme camino hacia el complicado mercado empresarial actual. Además, quiero agradecer a mi familia y mi pareja todo el apoyo y paciencia que han depositado en mí ya que sin ellos no estaría en el lugar que me encuentro hoy.

¡¡¡A todos ellos, Gracias!!!



Fig. 1: Edificio Sabatini



Fig. 2: Vista del campus desde la biblioteca



Resumen

El presente documento trata sobre una serie de diseños mecánicos y cálculos de carácter fluido-térmico que se han realizado sobre una antena embarcada en una aeronave de combate, trabajo encargado a una empresa dedicada a proyectos de envergadura internacional tanto de carácter civil como militar. Por este motivo, el trabajo que se expone en esta memoria es la resolución de un problema concreto de índole industrial que se encuentra englobado dentro de un proyecto de gran complejidad y extensión.

En un primer lugar, se abordará el proceso realimentado de diseño y cálculo de los módulos estructurales portadores directos de la electrónica de la antena. Estos equipos tendrán la doble misión de dar soporte y evacuar el calor que ésta genere, de la forma más eficiente posible, hasta conseguir alcanzar los requisitos impuestos por el proyecto. La antena se compondrá de 44 módulos “Plank” divididos en 5 grupos, según su tamaño, y será necesario dar una solución de diseño válida para todos ellos.

En segundo lugar se trabajará sobre el Distribuidor-Colector que reparte el fluido de refrigeración que alimenta a los Plank y al mismo tiempo sirve de soporte para todos ellos. El objetivo será el diseño de las boquillas que sirven de interfaz entre el Distribuidor-Colector y los Plank, de forma que se consiga que el fluido se distribuya entre todos ellos de forma automática y proporcionalmente según sea las necesidades de cada uno de ellos, las cuales se encuentran detalladas en los requisitos del sistema. Este orden de trabajo viene determinado por la influencia de la caída de presión en los “Plank” sobre el diseño de boquilla que le corresponda a cada uno de ellos ya que, al mismo tiempo que se resuelve el problema térmico planteado en el párrafo anterior, se conseguirá los datos de caída de presión que son necesarios para esta segunda parte del proyecto.



Abstract

This document focuses on a series of mechanical designs and calculations of fluid-thermal nature have been made on an antenna embarked on a fighting aircraft, work commissioned from a company dedicated to international-scaled projects both civil and military. For this reason, the work described in this report is to solve a specific problem of industrial nature which is encompassed in a project of great complexity and length.

In the first feedback process will address the design and calculation of the structural modules of the electronic direct carriers of the antenna. These systems will have the dual mission of providing support and dissipate the heat being generated in the most efficient way possible, until it reached the requirements of the project. The antenna is composed of 44 modules “Plank” divided into 5 groups according to their size, and we must give a valid design solution for all of them.

Secondly, we will work on the collector-distributor that distributes the cooling fluid that feeds the Plank and also serves as a support for them. The aim is the design of the nozzles that serve as interface between the collector and “Plank”, so as to get the fluid to circulate between them automatically and equitably as the needs of each of them that detailed in the system requirements. This work order is determined by the influence of pressure drop in the “Plank” on the nozzle design that corresponds to each of them and at the same time it solves the thermal problem raised in the previous paragraph shall be achieved the pressure drop data we need in this second part of the project.



Índice

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	3
Abstract.....	5
Glosario de términos.....	9

Capítulos:

1. Introducción.....	11
1.1 Motivación.....	11
1.2 Objetivos.....	14
1.3 Etapas.....	16
1.4 Estructura del documento.....	17
2. Descripción y especificaciones del equipo.....	19
2.1 Introducción al equipo.....	19
2.2 Los módulos TRM.....	21
2.3 Los Módulos Plank.....	24
2.4 El Distribuidor-Colector.....	25
2.5 Especificaciones del fluido.....	27
2.6 Especificaciones de los Plank.....	27
2.7 Especificaciones del Distribuidor-Colector.....	28
3. Herramientas de trabajo y resolución.....	29
3.1 Flotherm®	29
3.2 ANSYS®	41
3.2.1 El módulo geométrico.....	44
3.2.2 El módulo de mallado.....	45

3.3.3 CFX®.....	48
3.3 LibreOffice.....	50
4. Modelado del Sistema.....	51
4.1 Los TRM.....	51
4.2 Los Plank.....	55
4.3 El Distribuidor-Colector.....	60
5. Soluciones Propuestas y Resultados.....	67
5.1 Diseño Preliminar.....	67
5.2 Diseño con 3 Canales.....	73
5.3 Diseño con 5 Canales.....	78
5.4 Diseño con 3 Canales Recortados.....	85
5.5 Diseño con 5 Canales Recortados.....	90
5.6 El Distribuidor-Colector.....	94
6. Conclusiones.....	139
7. Bibliografía.....	141
8. Presupuesto.....	143
9. Anexos.....	147

Glosario de términos

TRM: Transmit/Recieve Module (Módulo de Transmisión/Recepción)

HPA: High Power Amplifier (Amplificador de alta potencia)

ASIC: Circuito integrado que incorporan los módulos TRM

CPU: Central Processor Unit.

Corechip: Nombre que recibe la CPU de cada módulo TRM

LNA: Circuito integrado que incorporan los módulos TRM

IFF: Identification Friend Foe

BFU: Beam Forming Unit

PCB: Printed Circuit Board

SO: Sistema Operativo

FEM: Finite Element Model



1. Introducción

1.1 Motivación

La Ingeniería Industrial está considerada una de las Ingenierías clásicas, tradicionales, que ha sido un pilar fundamental a lo largo del proceso de desarrollo y mejora de la actividad industrial, durante los grandes momentos de creación y evolución del ser humano. Fue uno de los pilares básicos en los que se asentaron fenómenos como la Revolución Industrial (Figura 3), hecho que cambió por completo la forma de vida y que supuso un punto de inflexión en el desarrollo tecnológico.



Fig. 3: Niños trabajando durante la Revolución Industrial

Esta rama de la Ingeniería abarca todos los ámbitos del proceso industrial, desde la producción de equipos industriales hasta la organización industrial, pasando por el diseño y la investigación, en los más diversos campos como la electrónica, la mecánica, la termodinámica y la Ingeniería térmica y de fluidos (Figura 4).

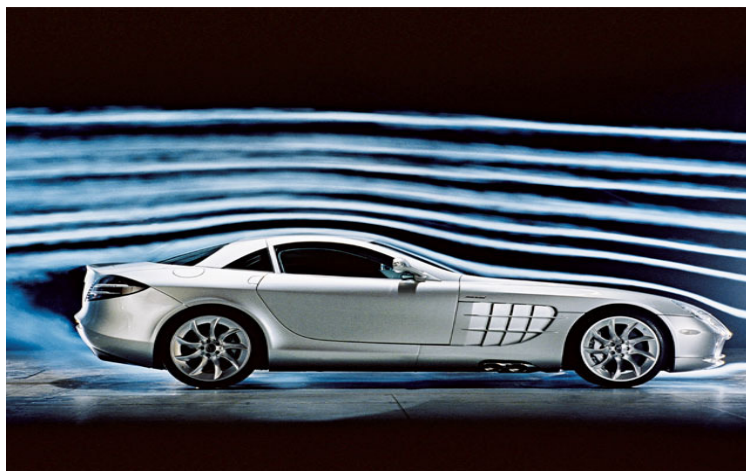


Fig. 4: Estudio aerodinámico en un túnel de viento

Respecto a este último, el estudio de la ingeniería térmica y de fluidos ha influido en el gran desarrollo de la electrónica a lo largo de finales del Siglo XX y principios del XXI, mediante la fabricación de instrumentos de refrigeración adaptados a la misma dispuestos para lograr la evacuación del calor que ésta genera, permitiendo de este modo que trabaje en su punto óptimo de funcionamiento.

Para el desarrollo de estos instrumentos de disipación de calor se pueden aplicar desde sencillos modelos para su resolución analítica hasta avanzados métodos computacionales.

Los métodos computacionales de resolución aparecieron y se desarrollaron durante la segunda mitad del Siglo XX al mismo tiempo que lo hacían los ordenadores ya que, a medida que éstos veían aumentadas su capacidad de cálculo y su memoria, más complejos eran los algoritmos y métodos de resolución que se podían resolver.

En la actualidad, a la cabeza de los métodos de resolución de problemas físicos mediante técnicas computacionales se encuentran los que se basan en el Método de los Elementos Finitos (más conocida como FEM).

Esta técnica se basa en la creación de modelos que tratan de imitar la geometría del sistema real objeto de análisis mediante la discretización de la misma en pequeñas porciones llamados comúnmente “Elementos” sobre los que se aplicarán las condiciones de contorno a las que se ve sometido el modelo real con el objetivo de extraer los resultados objeto del estudio (Figura 5).



Fig. 5: Biela real y biela calculada por FEM

Este proyecto fin de carrera se engloba en este campo de los elementos finitos aplicados a un sistema altamente tecnológico, en concreto en el modelado fluido-térmico por elementos finitos de un sistema de disipación de calor de una antena instalada en un avión.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto consistirá en el diseño (estudio, cálculo y dimensionamiento) de los circuitos de refrigeración que incorporan unas estructuras portadoras de electrónica para ser enfriadas. Estas estructuras soportan las tarjetas electrónicas de una antena de uso aeronáutico.

Para el correcto diseño de ese sistema será necesario cumplir unas especificaciones impuestas por las condiciones de funcionamiento de la antena así como de los equipos auxiliares que darán apoyo al circuito hidráulico y que se encuentran embarcados en la aeronave.

Las principales restricciones de obligado cumplimiento serán del tipo:

- Temperatura máxima en la electrónica.
- Salto térmico entre distintos módulos de la electrónica.
- Caída de presión total en el circuito.
- Correcta distribución de refrigerante.

Para el correcto cumplimiento del objetivo principal, será necesario verificar una serie de hitos intermedios u objetivos secundarios que, al mismo tiempo servirán de guía para verificar que los cálculos y diseños son correctos. Estos objetivos serán:

- Validar el modelo FEM que se construirá en Flotherm[®] para el diseño de los canales de refrigeración y obtención de las caídas de presión que necesarias para el resto del análisis.
- Verificar la condición de temperatura máxima en la electrónica.
- Obtención del diámetro de los racores existentes en la interfaz Plank – Distribuidor.
- Validar el modelo FEM que se construirá en ANSYS[®] Workbench para el cálculo de los racores.
- Verificar la hipótesis de la independencia de la situación del Plank en el Distribuidor de cara a su comportamiento fluido-dinámico.

En la Figura 6 se ofrece el cronograma que se seguirá para la obtención de los resultados adecuados a las especificaciones de diseño.

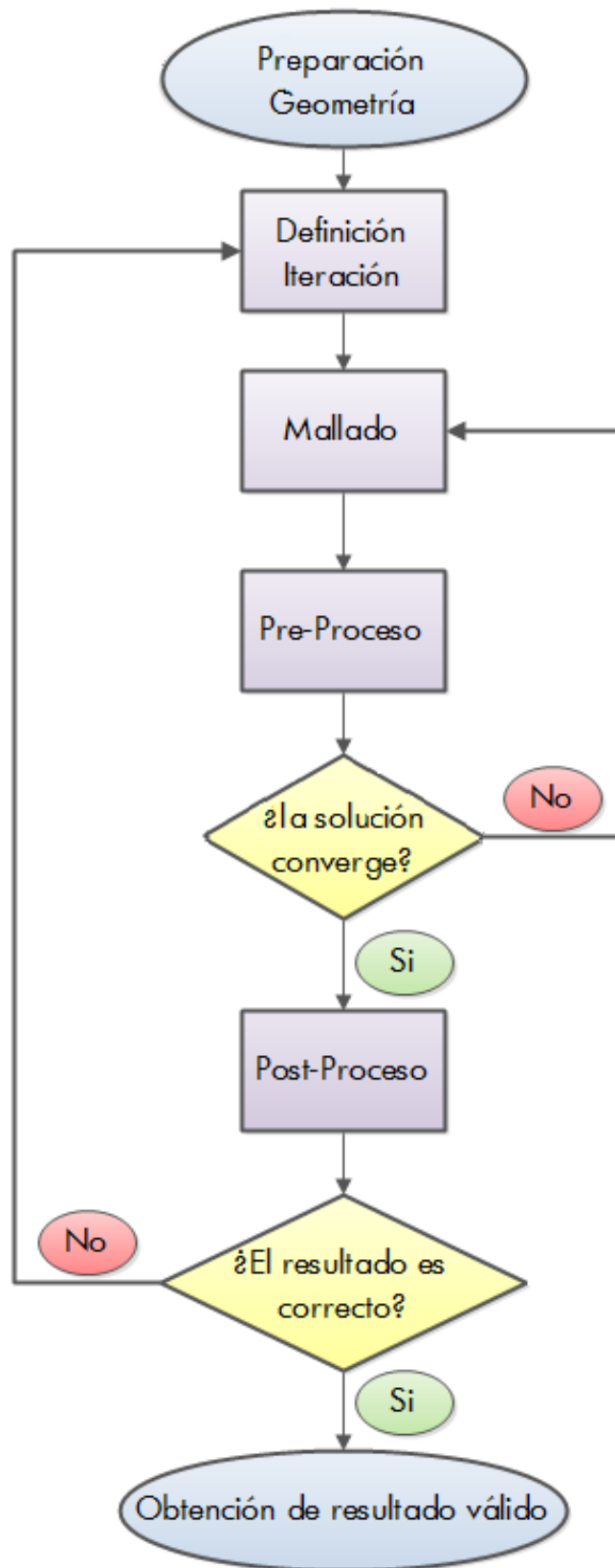


Fig. 6: Secuencia de diseño del sistema de refrigeración.

1.3 Etapas del proyecto

Para alcanzar el éxito en las consecuciones de todos los objetivos, principales y secundarias marcados en el apartado anterior, fue necesario desarrollar las siguientes etapas en este orden lógico:

1. Recepción y Análisis del diseño de las estructuras portadoras de la electrónica para la comprensión total del modo de trabajo de las mismas.
2. Estudio de las especificaciones y requerimientos deseados y de obligado cumplimiento sobre el sistema de refrigeración.
3. Una vez se tiene pleno conocimiento de las geometrías y especificaciones sobre las que se realizará el trabajo, será necesario definir claramente el problema que sobre ellas se plantea, de forma que seamos capaces de resolverlo en la manera más eficiente posible.
4. Tras la definición del problema, será necesario diseñar una eficaz estrategia de resolución que pasará por la elección de las herramientas y procedimientos de cálculo adecuados para tal efecto.
5. El siguiente paso será acceder a la documentación y manuales que estos programas ofrecen para el pleno conocimiento de los módulos que se emplearán en la resolución de los problemas. Para completar esta tarea con éxito, se resolverán ejemplos prácticos ofrecidos por dichos manuales para alcanzar un manejo suficiente de las herramientas que nos permita abordar los problemas en su totalidad.
6. Llegados a este punto, se formularán las hipótesis que nos permitan obtener un primer diseño del circuito de refrigeración para su posterior evaluación y, de este modo, poder realizar los sucesivos rediseños hasta alcanzar una solución válida.
7. Por último se obtendrán las conclusiones finales sobre todos los cálculos realizados y se redactará la documentación explicativa necesaria para su archivo, exposición y comprensión por terceras personas.

1.4 Estructura del documento

Este documento se encuentra estructurado en un primer capítulo a modo de introducción, siete capítulos dedicados al modelado, diseño y análisis, un último capítulo de conclusiones y la bibliografía.

- ⤴ En el primer capítulo de introducción se encuentra un resumen de los objetivos planteados y de la forma en que se abordarán para su consecución.
- ⤴ En el segundo capítulo se encuentra la presentación y descripción del equipo así como de todos los módulos que lo componen, de forma que, tras su evaluación, el lector haya conseguido familiarizarse con la terminología y los distintos equipos empleados.
- ⤴ El tercer capítulo se encuentra dedicado a la exposición y explicación de las restricciones que será necesario cumplir y que a su vez definen la problemática a resolver.
- ⤴ En el cuarto capítulo se encuentra una descripción de los programas que se han elegido para resolver los problemas que se han planteado y modelado en el capítulo anterior así como la explicación de las particularidades de cada uno de ellos y porque resultan adecuados para tal fin.
- ⤴ El quinto capítulo se encuentra dedicado al modelado de cada uno de los problemas, es decir, cual va a ser la forma en la que adaptemos la realidad de cada uno de los módulos a estudiar a las capacidades de cálculo y limitaciones de cada uno de los programas.
- ⤴ El sexto capítulo está dedicado a la resolución y análisis de los diseños iniciales y todos los rediseños que éstos propiciarán.
- ⤴ El séptimo capítulo se encuentra dedicado a la evaluación de los resultados y como, mediante estos, podemos concluir que se han cumplido los objetivos propuestos a lo largo del capítulo de introducción.
- ⤴ Por último se incluye una serie de anexos que recogen información adicional para la comprensión de este estudio.



2. Descripción y especificaciones del equipo

2.1 Introducción al equipo

El proyecto constará de dos partes diferenciadas:

- La primera de ellas consistirá en el diseño y cálculo del conducto de refrigeración de los soportes (a partir de ahora **Plank**) que sustentan unos encapsulados (a partir de ahora **TRM**) y una tarjeta (**PCB**) que contienen una parte fundamental de la electrónica de una antena de aplicación aeronáutica.

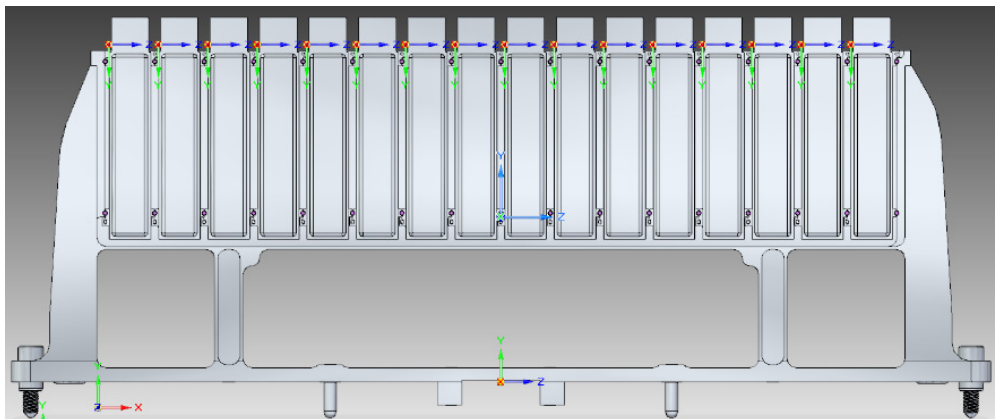


Fig. 7: Módulo Plank

Dichos elementos disipan una elevada potencia necesaria para la actividad que realizan que debe ser evacuada mediante el empleo de un refrigerante ya que debido a la ubicación del sistema, la evacuación de calor de forma natural es casi inexistente para los rangos de trabajo de la electrónica y por tanto provocaría el

fallo de la misma que debe operar dentro de unas especificaciones concretas de temperatura absoluta y relativa. La geometría de estos módulos es la que se ve en la Figura 7.

- La segunda parte consistirá en el estudio fluido-dinámico y posterior diseño de parte del **Distribuidor-Colector** (véase Figura 8) que reparte el caudal entre los 44 Plank que componen la antena de forma que cada uno de ellos reciba la porción de caudal que le corresponde que, a su vez dependerá del número de TRMs que tiene cada Plank, de su ubicación en la antena y del diseño final del sistema de refrigeración de cada uno de los Plank.

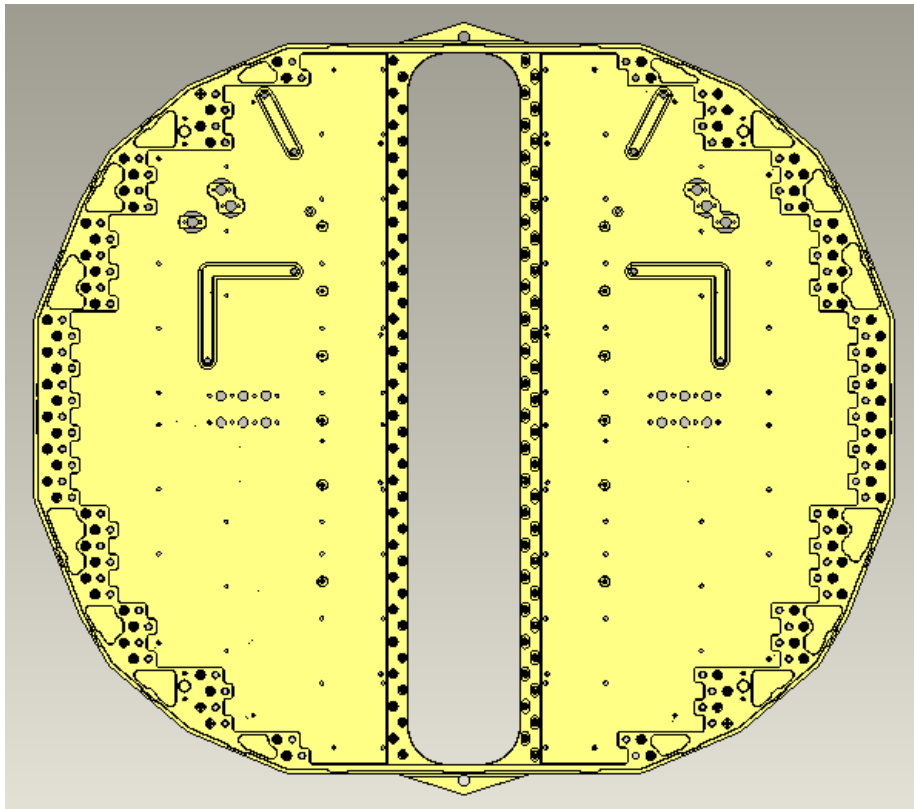


Fig. 8: Alzado del Distribuidor-Colector

2.2 Los módulos TRM

Son pequeños encapsulados que componen una de las partes fundamentales de la electrónica de la antena tal y como se observa en la Figura 9:



Fig. 9: Vista en alzado de varios TRM colocados en un Plank

En la Figura 10 se pueden observar las distintas “capas” que componen los módulos TRM cuya misión se explica a continuación por orden de importancia:

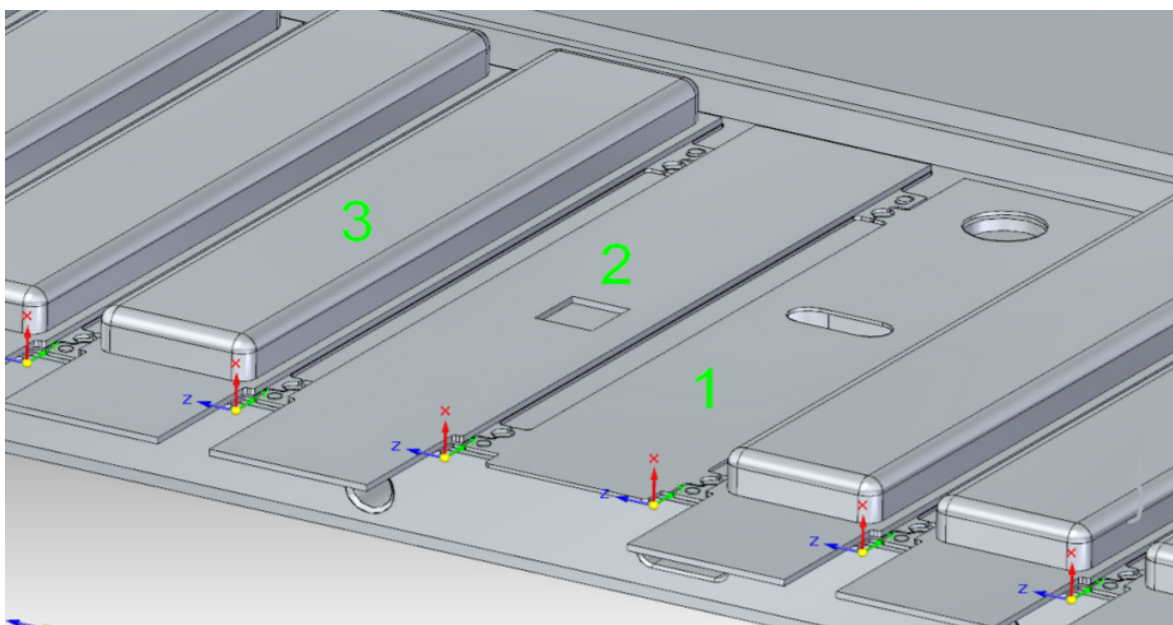


Fig. 10: Detalle de las capas de un TRM

- La capa marcada con el número **2** es la principal de dichos módulos puesto que se trata de una pequeña PCB donde se encuentran ubicados los componentes electrónicos que hacen funcionar al sistema y que al mismo tiempo disipan el calor que será necesario evacuar. Dicha placa interactúa con una PCB mayor que se encuentra situada a la espalda del conjunto Plank y que se encuentran conectadas a través de un conector que pasa a través del orificio ovalado que se puede observar en la capa número 1. De todos los componentes que se encuentran en esta PCB prestaremos especial interés sobre 5 de ellos, entre los cuales disipan prácticamente el 100% de la potencia del módulo. De estos cinco componentes, 3 se encuentran situados sobre la PCB y los otros dos lo están “dentro” de ella, ocupando el volumen vacío de forma cuadrada que se observa en dicha capa. Esto es debido a la gran disipación de energía que se produce en ambos, lo que hace imposible su evacuación a través de la PCB, por tanto se opta por que entren en contacto directamente con la capa 1 que se explicará a continuación y que sus patillas entren en contacto con la cara superior del PCB como si dichos componentes se encontrasen situados “boca abajo” según su posición normal de montaje.
- La capa **1** está compuesta por una aleación de molibdeno y su misión es facilitar el contacto entre la PCB (capa 2) y el aluminio que compone la estructura del Plank para facilitar la evacuación de calor hacia éste. Se encuentra perforado en su zona central con el objetivo de permitir el paso del conector que une las PCB del TRM con la PCB que se encuentra a la espalda del dispositivo y que controla todos los TRM.
- La capa **3** es una cubierta que protege la electrónica de posibles impurezas que floten en el ambiente de trabajo.

La distribución de los cinco componentes antes mencionados es la que se detalla en la Figura 11:

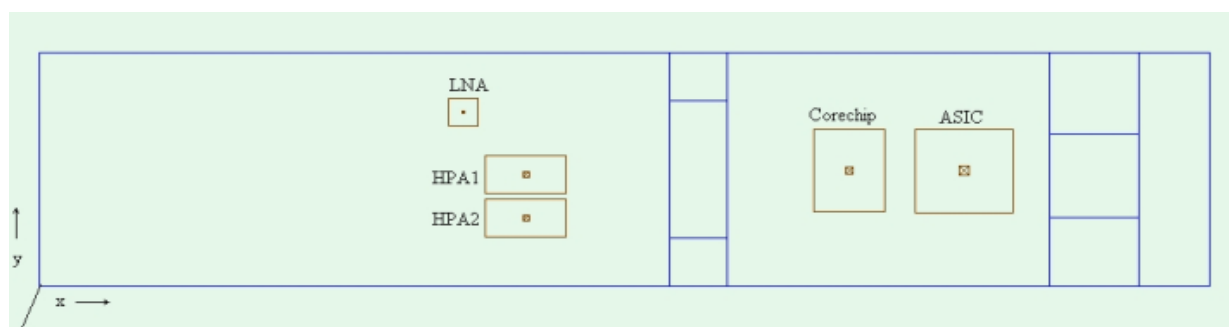


Fig. 11: Distribución de la electrónica en los TRM

Y sus características son:

Tabla 1: Características de los componentes electrónicos

Componente	Δx [mm]	Δy [mm]	Pos. x [mm]	Pos. y [mm]	Potencia[W]
HPA 1	4,5	2,25	25,12	5,58	1,379
HPA 2	4,5	2,25	25,12	2,98	1,379
Corechip	4	5	43,6	4,45	0,917
LNA	1,624	1,624	23,05	9,66	0,217
ASIC	5,52	5,02	49,29	4,43	0,316

A la vista de la Figura 12, se puede deducir que los componentes que pueden resultar problemáticos desde el punto de vista de la temperatura son el HPA1 y 2 debido a dos factores:

- Su elevada potencia relativa al resto de componentes.
- Su proximidad entre ellos hace que el calor tenga menos vías de escape.
- Su distancia a la zona asignada para el diseño de los canales de refrigeración.

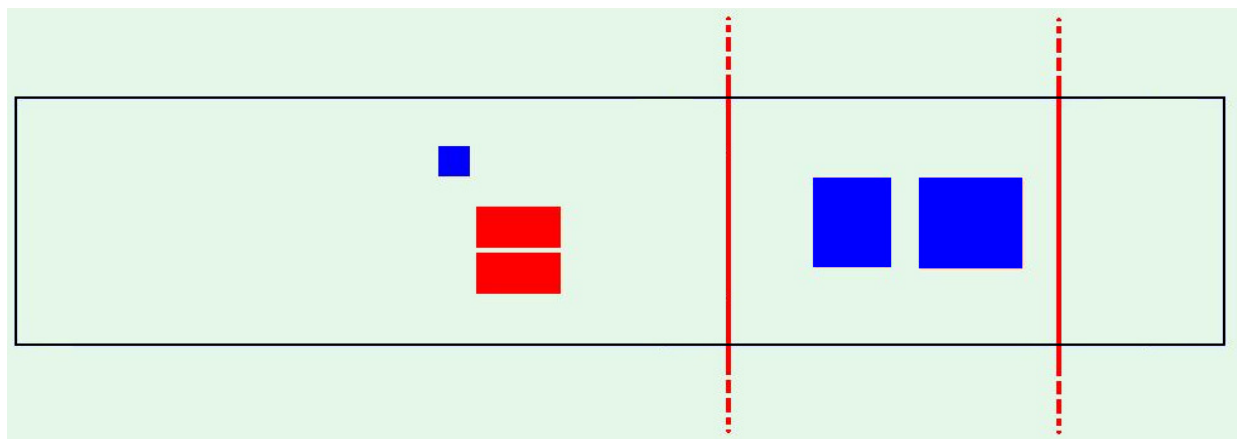


Fig. 12: Zona asignada al Plank para el circuito de refrigeración

2.3 Los Módulos Plank

Se trata de una estructura compuesta en su totalidad por aluminio 6061 (Figura 13).

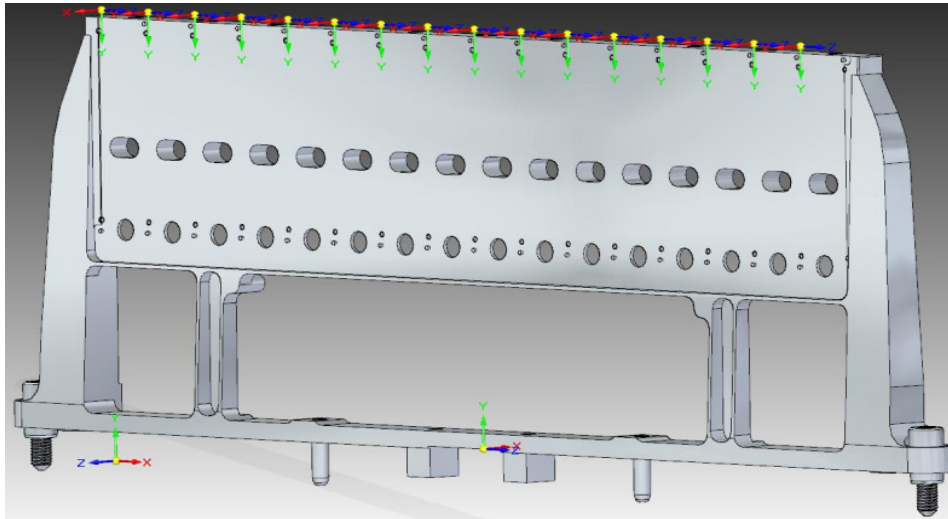


Fig. 13: Plank de 16 TRM.

Las principales funciones que deben cumplir estos módulos son:

- Actuar como soporte físico para mantener los módulos TRM en su posición correcta relativa a la aeronave.
- Evacuar el calor que éstos generan y conducirlo hacia el fluido para ser evacuado del equipo.
- Actuar como aislante mecánico para que la energía vibracional no alcance la electrónica que sustenta.

Con objeto de cubrir el mayor área posible de la disponible sobre el Distribuidor- Colector, existen módulos Plank que portan 16, 24, 32, 36 y 40 TRM y, debido a que los TRM no ven alterada su geometría independientemente del Plank en el que vayan montados, éstos tendrán que adaptar necesariamente su longitud y por tanto su capacidad de evacuar calor para cumplir con los requisitos que se establecerán en las especificaciones.

2.4 El Distribuidor-Colector

Se trata de una estructura de aluminio de forma circular que se encuentra ubicada en la zona delantera de la aeronave. Entre sus principales funciones encontramos las siguientes:

- Servir como soporte a los Plank, de forma que estos tengan un asiento que los mantenga de forma fija en su posición.
- Repartir el caudal de refrigerante entre todos los Plank equitativamente según la especificación.
- Recoger el caudal de refrigerante a la salida de los Plank.
- Servir de soporte para otros equipos que incorpora la aeronave

El aspecto de esta pieza sin montar ningún otro sistema sobre ella es el mostrado en la Figura 14:

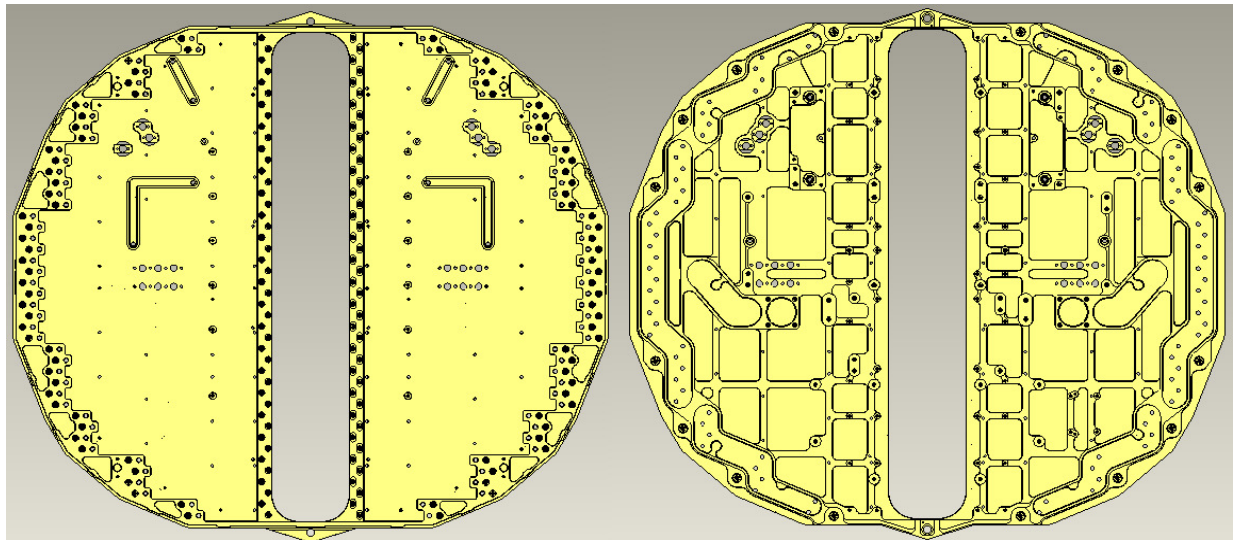


Fig. 14: Vista delantera y trasera del Distribuidor-Colector

El montaje de los Plank sobre el Distribuidor-Colector se realiza en perpendicular al plano del mismo, y de dentro hacia fuera según sean éstos de mayor o menor tamaño como se muestra en las Figuras 15 y 16:

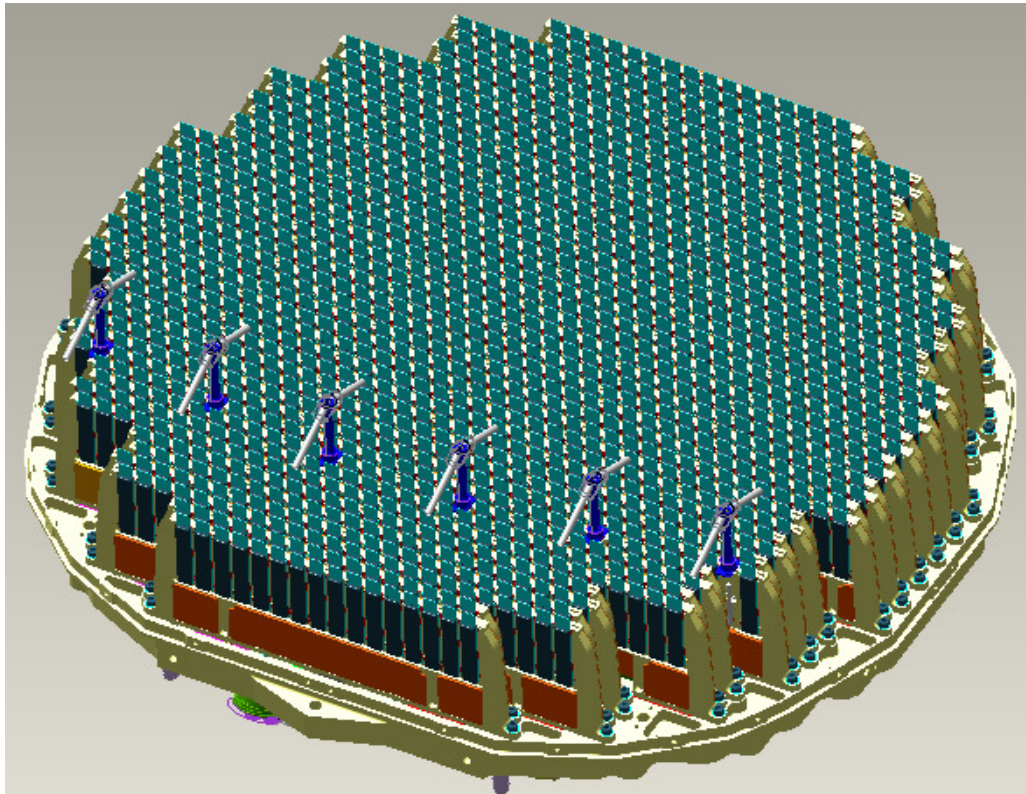


Fig. 15: Montaje de los 44 Plank sobre el Distribuidor-Colector

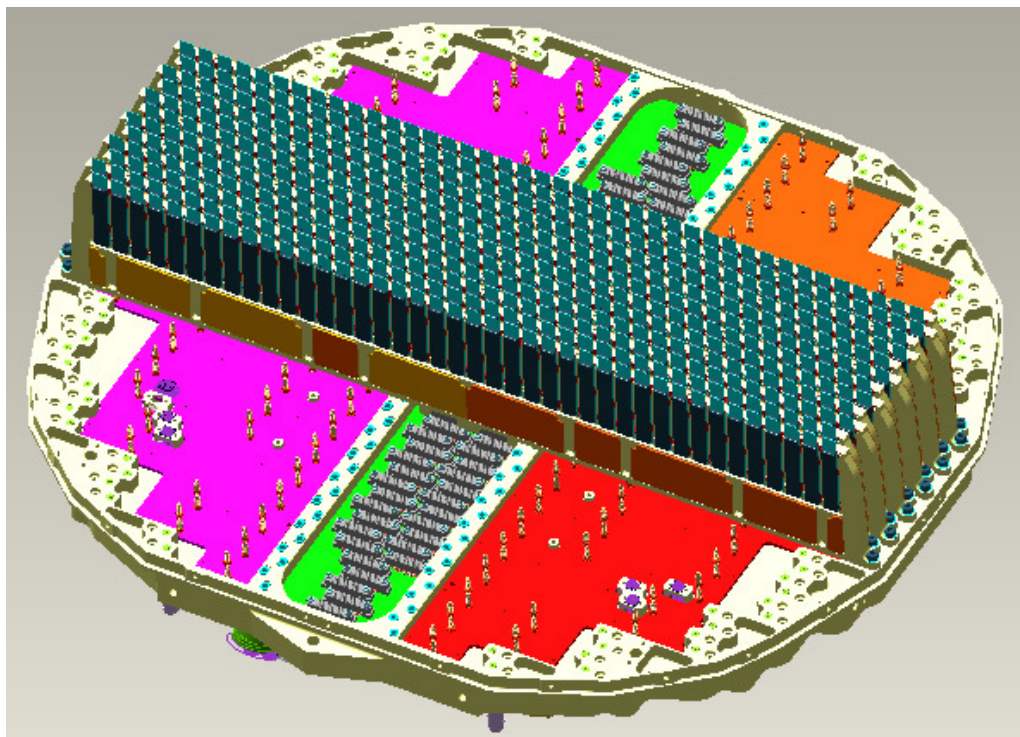


Fig. 16: Montaje de los Plank con 40 TRM sobre el Distribuidor-Colector

Además, de cara a la realización del diseño y análisis de los diferentes subsistemas que se han mostrado en los capítulos anteriores, será necesario cumplir con las siguientes restricciones impuestas por el diseño y funcionamiento de los mismos:

2.5 Especificaciones del fluido

Como se mencionó en los capítulos anteriores, la refrigeración de los TRM se conseguirá evacuando el calor que en ellos se produce a una corriente de fluido que fluye por el interior de los Plank. El fluido que se empleará para este fin será una mezcla homogénea de Ethylene Glycol y agua en proporción 60:40 (40 partes de agua por cada 100 de mezcla).

Las restricciones que afectan al fluido de trabajo para nuestro análisis son:

- La caída de presión no podrá ser superior a los 345 KPa desde la entrada hasta la salida en el Distribuidor-Colector.
- La temperatura de entrada del fluido al Distribuidor-Colector oscilará entre los 20°C y 40°C.
- El caudal proporcionado para todo el sistema es de 0,222 Kg/s.

Las propiedades de esta mezcla dependerán (como en todo fluido) de la temperatura de trabajo del mismo y, dado el rango anterior, se trabajará en todo momento suponiendo un peor caso de $T = 40^{\circ}\text{C}$, para la cual, las propiedades son:

Tabla 2: Propiedades del fluido Water-Glycol 40:60

Propiedad	Valor
Densidad [Kg/m^3]	1035,5
Viscosidad Dinámica [$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$]	2,58E-003
Conductividad [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]	0,38
Calor Específico [$\text{J}/\text{Kg}\cdot\text{K}$]	3250

2.6 Especificaciones de los TRM

Estos módulos electrónicos se caracterizan por ser extremadamente sensibles a la temperatura pero no porque vayan a romper antes que cualquier otro circuito (de hecho, esta temperatura se encuentra dentro del rango típico de temperaturas de rotura de la electrónica), sino porque si se quiere que la antena proporcione una imagen clara es estrictamente necesario que la diferencia de temperatura entre el TRM más y menos caliente no supere los 10°C dentro de un mismo Plank. Por tanto se establece que:

- $T_{\text{máx}}(\text{TRM}) < 100^{\circ}\text{C}$
- $\Delta T(\text{Plank}) < 10^{\circ}\text{C}$

2.7 Especificaciones del Distribuidor-Colector

Tal y como se explicó en la descripción del equipo, la misión de este elemento objeto de análisis es que sea capaz de repartir el fluido de refrigeración entre los Plank según las necesidades individuales de estos. Estos requerimientos serán:

Tabla 3: Porción de refrigerante correspondiente a cada Plank

Unidad	Nº Elementos	Qmásico [Kg/s]	Qmásico/unidad [Kg/s]
Plank 16	4	0,01	0,0025
Plank 24	8	0,029	0,0036
Plank 32	8	0,039	0,0049
Plank 36	12	0,066	0,0055
Plank 40	12	0,073	0,0061
IFF	2	0,003	0,0050
BFU	1	0,002	
Total →		0,222	

3. Herramientas de resolución

3.1 Flotherm[®]

Se trata de la principal herramienta de resolución que se ha empleado a lo largo del proyecto. Es un software de resolución de problemas térmicos y fluido-dinámicos propiedad de la empresa Flomerics. La versión que se ha empleado ha sido la 7.1 disponible únicamente para versiones de Windows[®] de 32bit. En la actualidad, la última versión disponible es la 9.1 con soporte multinúcleo y 64bit. Se trata de un software del tipo CAE (Computer Aided Engineering). Más concretamente, se trata de un programa de resolución mediante el Método de los Elementos Finitos (Conocido como FEM en Inglés) del tipo iterativo. Esto último significa que para arrancar el cálculo, el software nos pedirá que le proporcionemos un dato cercano a la solución para una de las variables, de forma que tarde el menor tiempo posible el converger a la solución.

¿Por qué Flotherm[®] y no otro software de FEM? La respuesta es clara: La mayor parte de los software profesionales de carácter genérico para el análisis y resolución de sistemas incorporan multitud de módulos independientes que permiten la resolución de prácticamente cualquier aplicación que nos podamos imaginar, desde los más comunes análisis estáticos y estructurales a los más complejos cálculos transitorios, de pandeo, electromagnéticos, etc., y, por supuesto, todos ellos son capaces de realizar análisis térmicos y de fluidos como los que se realizarán a lo largo de este documento.

La principal diferencia entre Flotherm[®] y el resto de software comerciales radica en su carácter NO genérico, es decir, que se trata de un programa específicamente diseñado para el análisis de sistemas electrónicos no permitiendo realizar otro tipo de análisis. Obviamente, al tratarse de un software dedicado específicamente a la aplicación que nos ocupa, posee herramientas que en ocasiones simplifican mucho tareas triviales. Para que esto último se entienda, podemos pensar en el caso de un disipador de aletas rectas estándar. En una herramienta como ANSYS, de pretender modelar un elemento de estas características por todos

conocido resulta una tarea un tanto pesada ya que habrá que diseñar la geometría del mismo de principio a fin. Este mismo componente puede ser diseñado en Flotherm[®] en apenas unos minutos debido a que posee una herramienta específicamente diseñada para el modelado de estos componentes de tanta utilización en aplicaciones electrónicas. Bastará con introducir los parámetros geométricos que definan nuestro elemento (en este caso, longitud de aletas, espesor de las mismas, separación entre ellas, espesor de la base,...) para que éste quede completamente modelado en cuestión de minutos.

El desarrollo del trabajo con esta herramienta podría resumirse en los siguientes pasos que, como se podrá comprobar, coinciden en gran medida con la forma de trabajar en un software FEM de carácter generalista como pueda ser el paquete ANSYS Workbench. Tras arrancar el programa encontraremos que aparece la ventana que se muestra en la Figura 17:

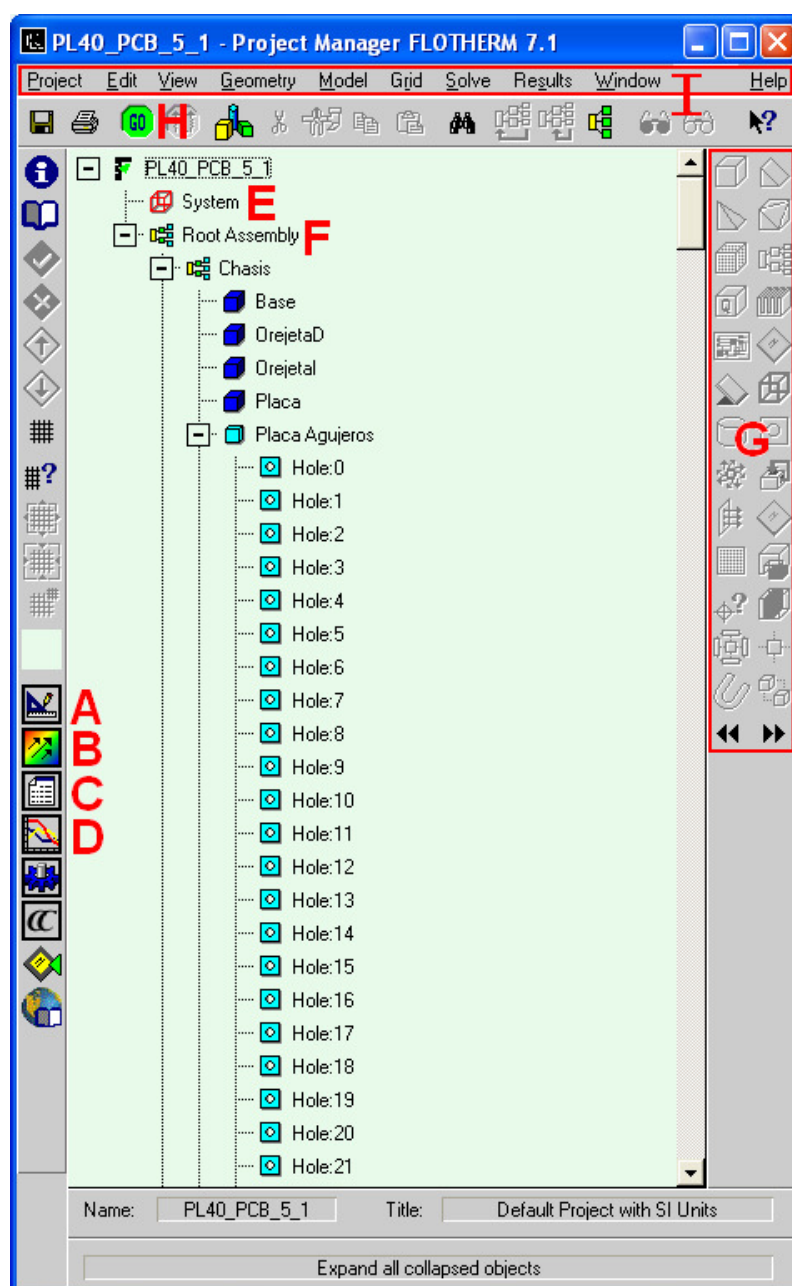


Fig. 17: Ventana principal

Se trata de la ventana principal de trabajo a partir de la cual podemos organizar el mismo y administrar el resto de módulos que componen el programa. Como se puede observar, debido a la forma de la ventana, se puede deducir que ésta no ocupa la totalidad del área de trabajo de la pantalla. Esto es porque el programa está diseñado de forma que la ventana principal siempre se encuentre visible pero ocupando la menor área posible que debe quedar libre para la ventana activa en la que se esté realizando el trabajo. Estas ventanas pueden ser llamadas pulsando los botones marcados con las letras de la **A** a la **D** y son en las que realmente se realizan las operaciones, siendo la ventana principal la que gestiona el intercambio de información entre ellas. Esta ventana se compone principalmente de los siguientes módulos:

A. Drawing Board: Se trata de la ventana dedicada al diseño y modelado de sistemas (Figura 18).

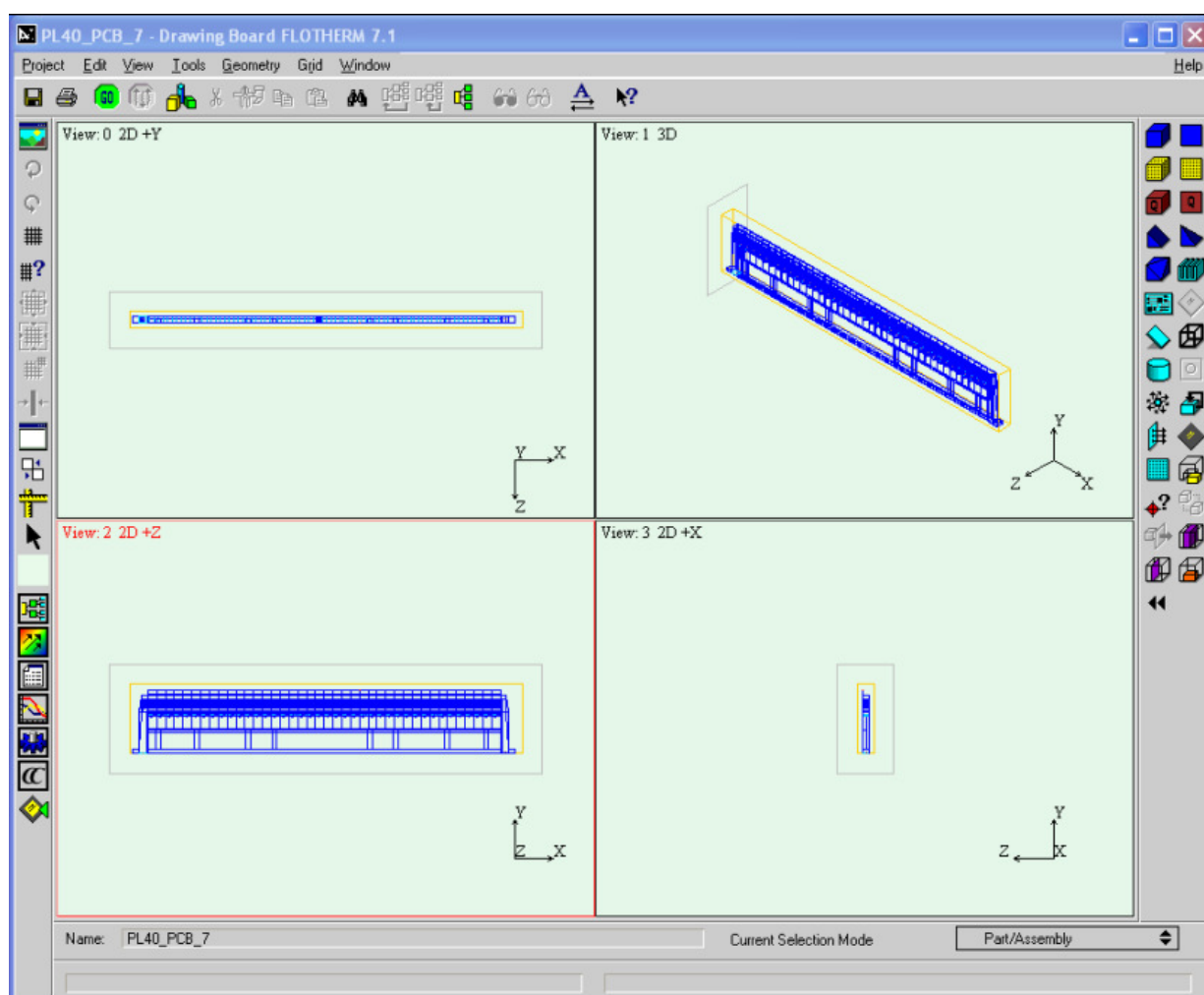


Fig. 18: Vista completa de la ventana principal del módulo Drawing Board

En Flotherm[®], a diferencia de otros programas de cálculo mediante FEM, la malla no se genera apoyándose en una geometría que se importa desde un programa de CAD, sino que es necesario generar la geometría de cero a partir de formas simples (cuboides, tetraedros, planos,...). Estas figuras predefinidas, de mayor o menor complejidad, son añadidas al árbol (Root Assembly) pulsando sobre su icono en el panel de objetos (**G**) para que posteriormente

sean tratados en el Drawing Board. Es en esta última ventana donde se tiene que modificar la geometría y características del elemento manualmente para que se adapte a su entorno.

Como se puede ver en la imagen superior, para facilitar el proceso creación del modelo, el Drawing Board nos muestra 4 vistas diferentes del modelo sobre las que trabajar al mismo tiempo, además del panel **G** (a la derecha) para añadir objetos al Root Assembly directamente. La geometría de estos elementos constructivos puede ser modificada introduciendo manualmente sus dimensiones o, arrastrando las líneas que delimitan su espacio hacia la dirección deseada mediante el empleo del ratón (operación de tipo *drag and drop*).

Esta última forma de trabajo, resultará especialmente útil en sistemas complejos para conseguir que el programa auto-alinee líneas que se encuentren demasiado juntas, de forma que el sistema apenas se vea alterado y, sin embargo, se consigan velocidades de convergencia muy superiores. Esto es así debido a que, a diferencia de otros software de tipo FEM, Flotherm[®] es un programa “auto-mallador”, lo que significa que no tendremos que indicarle que genere una malla adaptada a la geometría que le ha sido introducida en la fase de pre-proceso, sino que a medida que se introducen modificaciones sobre las dimensiones de cualquier elemento, el programa introducirá las modificaciones en la malla necesarias en tiempo real de forma que ésta sea consistente (por ejemplo, que la malla de un elemento no ocupe el espacio asignado a otro).

Debido a esta particularidad de mallado, el programa tenderá a superponer las líneas que delimiten las fronteras de los elementos contiguos ya que, allá donde haya una línea, Flotherm[®] generará elementos de la malla a partir de la misma, además de todos los elementos interiores al cuerpo que deseemos en función de la precisión que se desee obtener en el mismo hasta un límite global de 3 millones para todo el sistema.

En el caso de que en algún punto existan dos cuerpos próximos, pero no coincidentes, el programa generará una línea de elementos excesivamente esbeltos entre ambos, con los correspondientes elementos contiguos a los anteriores en los que ocurrirá el mismo efecto solo que en menor medida ya que estos últimos aumentarán de espesor hasta que se alcance el tamaño global de la malla. Este particular efecto recibe el nombre de concentrador lineal de elementos y provoca una densidad de elementos excesivamente alta en zonas no deseadas, haciendo que el modelo sea más pesado y, por tanto, de mayor complejidad a la hora de su resolución.

Estos defectos de mallado se pueden observar en la siguiente secuencia de imágenes extraídas del módulo *Drawing Board*. Se trata de 4 cuboides idénticos dispuestos inicialmente en una matriz de 2x2 con sus respectivos bordes en contacto superpuestos entre sí. Como se puede observar en la Figura 19, para un determinado tamaño de malla, la forma de ésta es uniforme tanto dentro como en la región que separa a los cuatro cuboides:

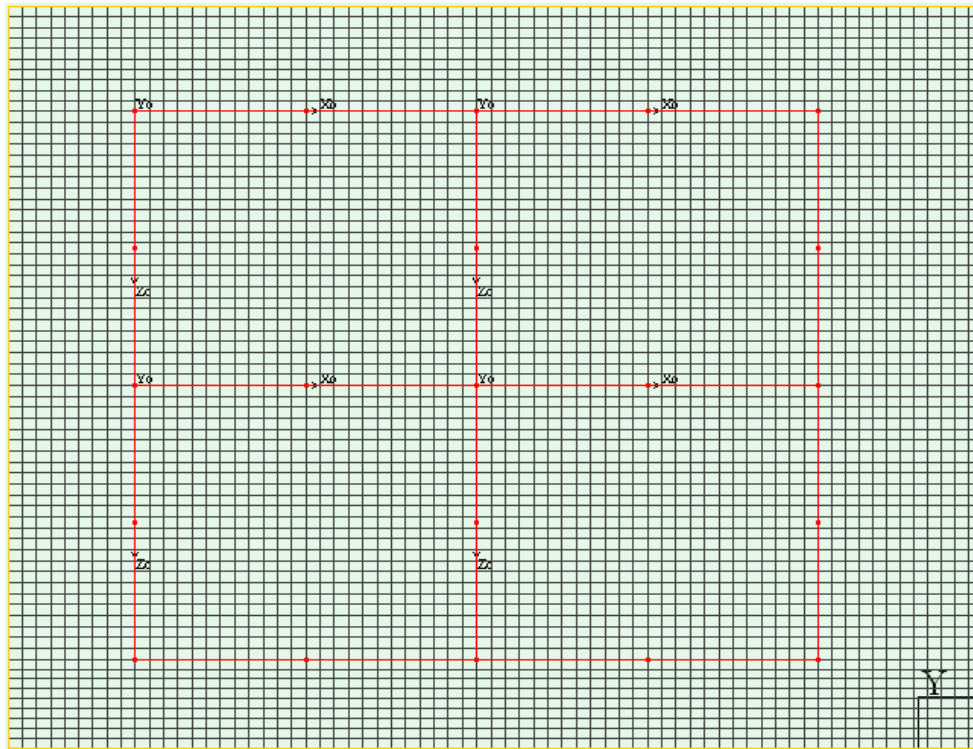


Fig. 19: 4 cuboides con bordes superpuestos

Si por el contrario, estos cuboides tuvieran sus áreas en contacto separadas entre sí, el efecto que ocurriría es el que se puede apreciar en la Figura 20:

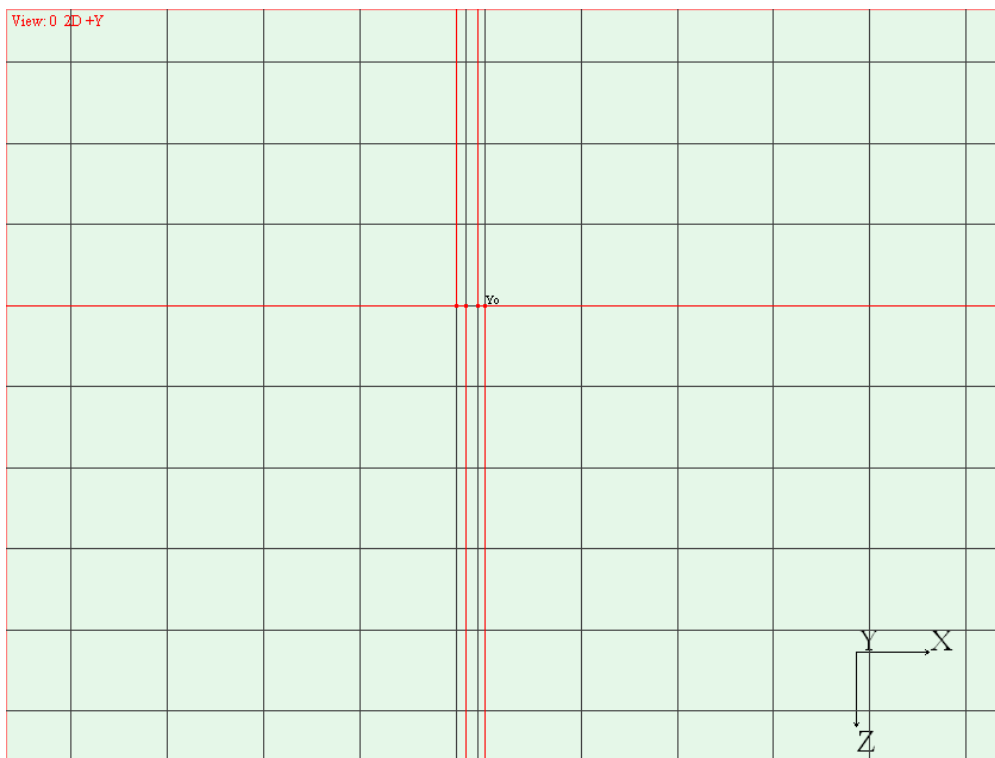


Fig. 20: Zona en contacto de los 4 cuboides sin superposición de bordes

Que visto con el mismo nivel de zoom que la imagen de la Figura 19, produce una línea vertical negra fruto de la concentración de las filas de elementos esbeltos que distorsionan localmente la malla y que se puede apreciar en la Figura 21.

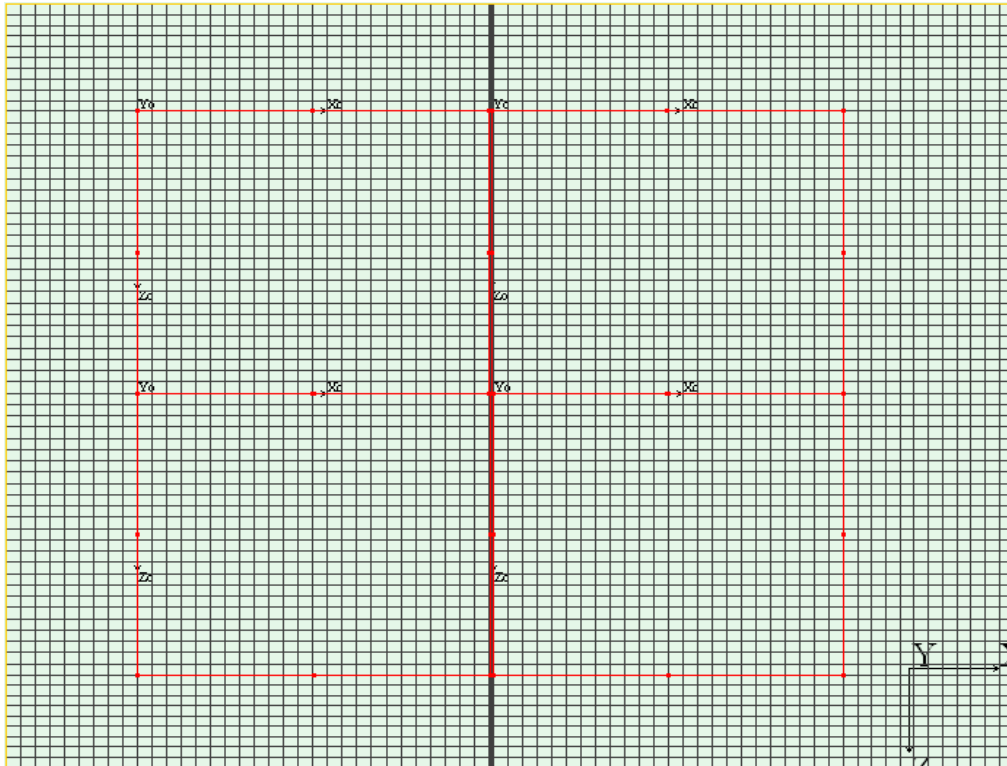


Fig. 21: Distorsión de la malla por concentración de elementos

B. Flomotion: Es el visor gráfico que incorpora la herramienta y tiene una doble misión:

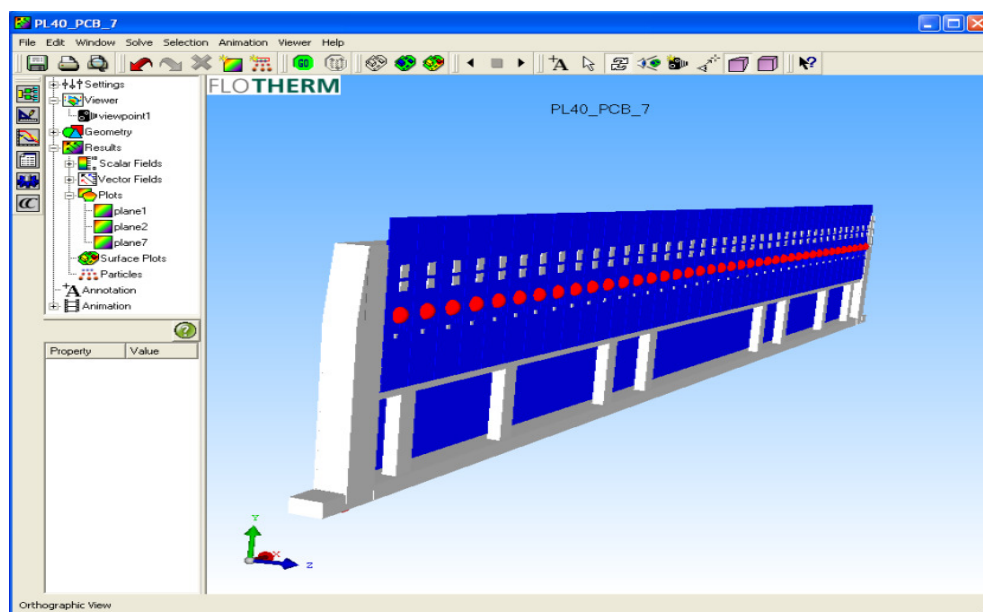
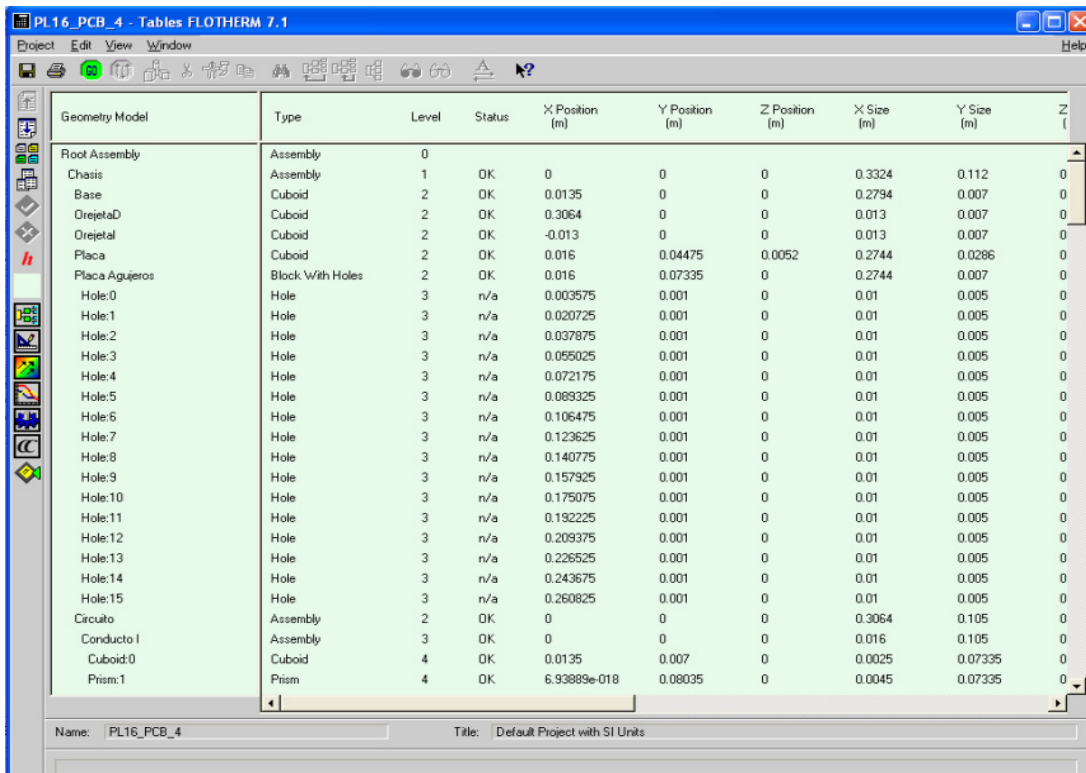


Fig. 22: Ventana principal de Flomotion

- ✧ Mediante el empleo de esta herramienta, podemos hacer el seguimiento tridimensional al proceso de creación del modelo puesto que la herramienta Drawing Board, en ocasiones resulta un tanto limitada para hacernos una idea del aspecto real que está adquiriendo el modelo.
- ✧ Este visor, además de lo anterior, hace las veces de postprocesador, es decir, será la herramienta que usaremos para procesar los resultados y convertirlos en diagramas escalares, diagramas vectoriales, planos de corte, etc., que representarán la variable que nos interese en cada momento. Las variables que se suelen representar en estos diagramas en un programa dedicado al cálculo fluido-térmico son:
 - Presión
 - Temperatura
 - Velocidad
 - Absoluta
 - Componente X
 - Componente Y
 - Componente Z

C. Tablas y Reports: Se trata de una herramienta diseñada para presentar los resultados en formato de tabla (Figura 23).



Geometry Model	Type	Level	Status	X Position (m)	Y Position (m)	Z Position (m)	X Size (m)	Y Size (m)	Z (m)
Root Assembly	Assembly	0							
Chasis	Assembly	1	OK	0	0	0	0.3324	0.112	0
Base	Cuboid	2	OK	0.0135	0	0	0.2794	0.007	0
OrejetaD	Cuboid	2	OK	0.3064	0	0	0.013	0.007	0
OrejetaL	Cuboid	2	OK	-0.013	0	0	0.013	0.007	0
Placa	Cuboid	2	OK	0.016	0.04475	0.0052	0.2744	0.0286	0
Placa Agujeros	Block With Holes	2	OK	0.016	0.07335	0	0.2744	0.007	0
Hole:0	Hole	3	n/a	0.003575	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:1	Hole	3	n/a	0.020725	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:2	Hole	3	n/a	0.037875	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:3	Hole	3	n/a	0.055025	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:4	Hole	3	n/a	0.072175	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:5	Hole	3	n/a	0.089325	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:6	Hole	3	n/a	0.106475	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:7	Hole	3	n/a	0.123625	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:8	Hole	3	n/a	0.140775	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:9	Hole	3	n/a	0.157925	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:10	Hole	3	n/a	0.175075	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:11	Hole	3	n/a	0.192225	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:12	Hole	3	n/a	0.209375	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:13	Hole	3	n/a	0.226525	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:14	Hole	3	n/a	0.243675	0.001	0	0.01	0.005	0
Hole:15	Hole	3	n/a	0.260825	0.001	0	0.01	0.005	0
Circuito	Assembly	2	OK	0	0	0	0.3064	0.105	0
Conducto I	Assembly	3	OK	0	0	0	0.016	0.105	0
Cuboid:0	Cuboid	4	OK	0.0135	0.007	0	0.0025	0.07335	0
Prism:1	Prism	4	OK	6.93889e-018	0.08035	0	0.0045	0.07335	0

Fig. 23: Vista de la ventana Tablas

Resulta una herramienta realmente útil para obtener información detallada del modelo que hemos construido o de su resolución. Además de permitir visualizar contenidos en forma de tabla, es capaz de generar un fichero en formato “.html” con la información que se desee extraer del fichero de resultados, de forma que se facilite en gran medida la exportación de los contenidos a otros programas, como por ejemplo hojas de cálculo. Esto último ha resultado de vital importancia durante el transcurso de este proyecto para generar las gráficas que lo acompañan.

D. Monitores y Residuos: Se trata de una ventana que aporta información de vital importancia durante el transcurso del proceso de resolución. El aspecto de la misma es el que se puede apreciar en la Figura 24.

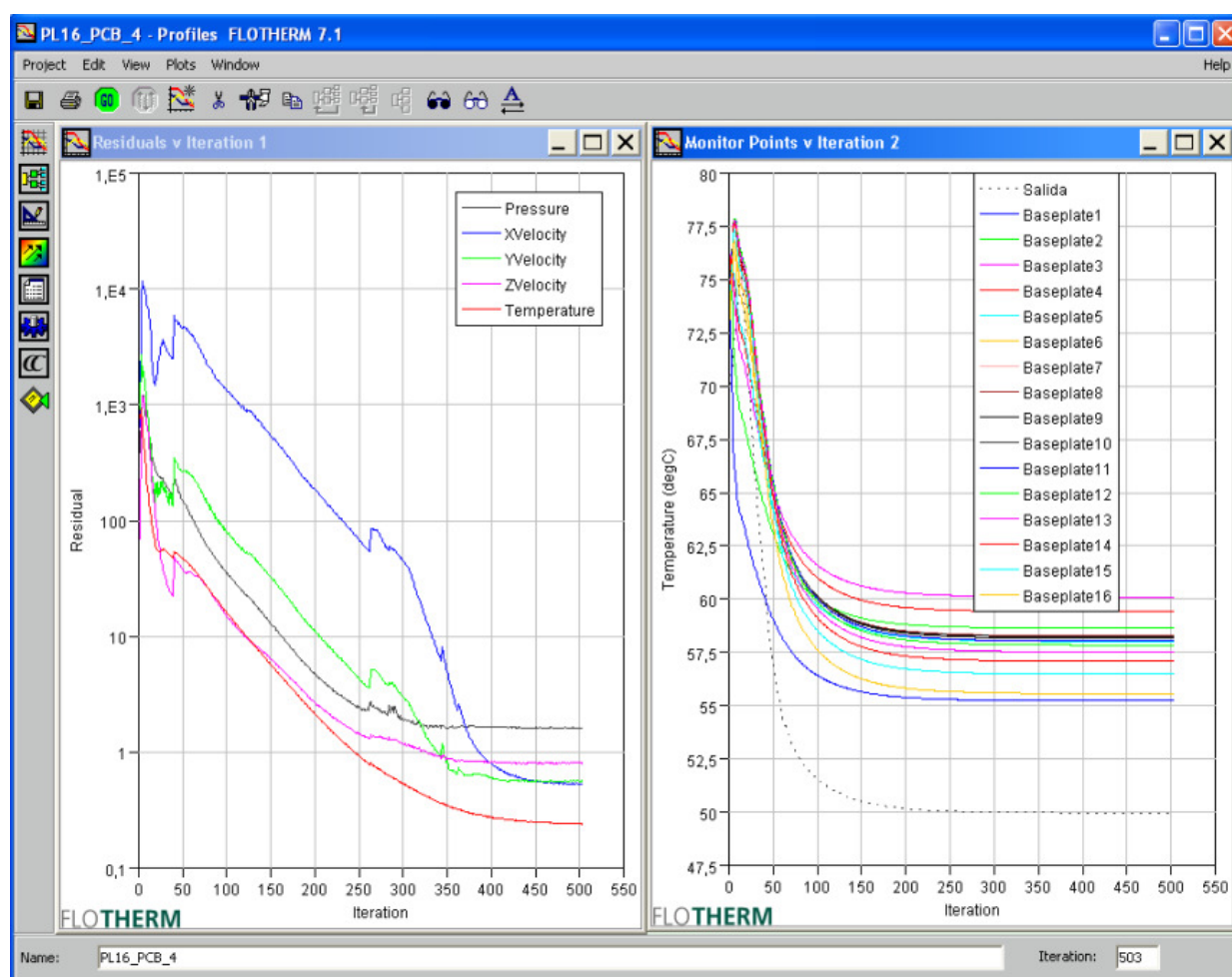


Fig. 24: Monitores y residuos

Como se puede comprobar en la imagen anterior, esta herramienta se encuentra dividida a su vez en dos ventanas:

- En la ventana situada en el lado izquierdo, podemos observar el gráfico de los residuos que Flotherm® genera por defecto durante la resolución de cualquier

caso de carga. El gráfico muestra el valor promedio de los residuos que el programa está manejando para cada una de las 5 ecuaciones en todos los puntos discretos del sistema en función del número de iteración en el que se encuentre el proceso.

- En la ventana situada en la parte derecha de la ventana, podemos observar la evolución del valor de las variables asignadas a los llamados “Monitor Points”. Estos son puntos marcados por el ingeniero y que ocupan una determinada posición dentro de la geometría del sistema que él mismo ha considerado que tiene un interés especial, bien porque conoce el valor de la variable o su orden de magnitud. El programa nos dará la evolución de estas variables en función del número de iteración en el que se encuentre de forma que podamos interrumpir el proceso en el caso de que dichas variables converjan fuera del rango esperado, lo cual será un indicativo de la existencia de un posible error de introducción de datos.

Estos dos gráficos en su conjunto serán los que nos permitirán validar o no una determinada solución que nos proporciona el sistema. Así pues, con carácter general, los criterios para validar una solución serán:

- ▲ Que el valor de los residuos sea el menor posible, en el mejor de los casos que llegue a cero, sin embargo, un valor estable (no oscilante) por debajo de 10 se considera válido. Esto último, en principio pudiera parecer que significa dar por buenos unos resultados que no lo son, sin embargo, esto se explica por que no todos los sistemas alcanzan el deseado **estado estacionario**. Imaginemos por un momento la simulación de una bandera sometida a un determinado caudal de aire en un túnel de viento. Es de esperar que, debido a la turbulencia del medio y a la poca rigidez del sistema, dicha bandera comience a oscilar y no se detenga a menos que cese la corriente de fluido. Este sería un claro ejemplo de un sistema carente de estado estacionario puesto que, por definición, este se trata de un instante temporal a partir del cual, todas las variables en todos los puntos del sistema permanecerán constantes desde ese punto en adelante. Si analizásemos ese ejemplo, encontraríamos que en las primeras iteraciones, el valor de los residuos sería muy elevado (> 1000) como en cualquier otro modelo. Sin embargo, con el transcurso de las iteraciones, estos residuos disminuirán hasta estabilizarse en un valor inferior a 10. Esto se debe a que en las regiones del espacio alejadas de la bandera, el valor de las variables que representan la corriente de aire habrán alcanzado un estado cuasi-estacionario, puesto que la influencia de las perturbaciones provocadas por la bandera apenas serán notorias. Sin embargo, en las regiones próximas a la misma, encontraremos que la situación es la contraria. Por este motivo, en el análisis de fluidos mediante técnicas FEM, será muy común encontrar una situación de cuasi-convergencia que se verá favorecida cuanto mayor sea el carácter laminar del flujo en todas las regiones del espacio que ocupe.
- ▲ Que el valor de los monitores sea estable y consistente, es decir:

- No se darán por buenos unos resultados cuyos monitores proporcionen un valor oscilatorio ya que esto significará que la solución aún no ha convergido totalmente. Normalmente esta situación viene acompañada por unos residuos elevados (> 100). Conviene revisar que la geometría se encuentra perfectamente diseñada y no hay “huecos” por los que se escape el fluido.
- No se darán por buenos unos valores que no sean consistentes desde el punto de vista ingenieril, es decir, aunque los residuos hayan convergido correctamente y las temperaturas de los monitores se hayan estabilizado, si por ejemplo, éstas son del orden de 10^2 y esperamos unas de 10^1 . Las acciones a tomar en este caso son:
 - En primer lugar habrá que revisar los parámetros de entrada al programa ya que es muy probable que hayamos cometido un error en el orden de magnitud de alguno de ellos. Conviene revisar por el siguiente orden:
 - ⤴ Caudales de entrada
 - ⤴ Propiedades el fluido
 - Conductividad (en el caso de que existan grandes diferencias de temperaturas)
 - Viscosidad (en el caso de que existan grandes discrepancias en las caídas de presión)
 - Calor específico (solamente en el caso de tratarse de un estudio transitorio y éste tenga una longitud temporal mucho más larga o corta de la esperada)
 - Densidad
 - ⤴ Propiedades de los materiales que delimitan el fluido:
 - Conductividad
 - Calor específico
 - Densidad
 - ⤴ Temperaturas iniciales
 - Del fluido
 - Del ambiente
- No se darán por buenos unos resultados cuyos residuos no converjan correctamente aunque aparentemente los monitores muestren unas variables estabilizadas ya que es más que probable que esas mismas variables en otro punto o incluso otras distintas no hayan convergido correctamente. En este caso las acciones a seguir son:

- Refinar la malla de forma global.
- Refinar la malla en las zonas que se consideren críticas.
- Cambiar el método de resolución.

E. *System* es una pestaña que nos permite controlar los parámetros fundamentales globales comunes para todo el sistema. Haciendo “click” con el botón secundario sobre la misma se despliega el siguiente menú que se puede ver en la Figura 25:

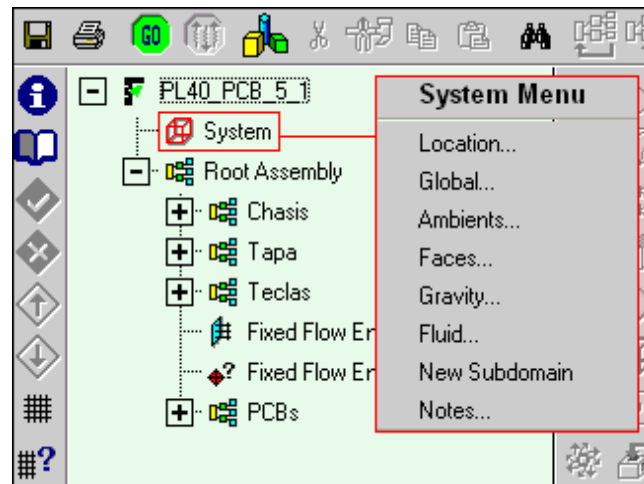


Fig. 25: Menú del sistema

Los parámetros que deben estar controlados en todo momento son:

- *Location*: Permite establecer las dimensiones del Sistema. Resulta fundamental la comprensión del concepto sistema y lo que engloba. **El Sistema será la porción de espacio sobre la que trabajaremos y sobre la que Flotherm® resuelve las ecuaciones.** Esto no quiere decir que el espacio empiece y acabe en las paredes de este sistema, ya que el programa es capaz de intercambiar calor y materia con el exterior del mismo, aunque no nos proporcionará información sobre lo que ocurra en dicho espacio. Es decir, se puede modelar sin problemas por ejemplo una pieza caliente sobre una superficie plana que intercambia calor por convección natural con el sistema y esta energía se desplazará hasta salir del mismo, sin embargo no podremos extraer datos de la temperatura del aire mas que en los puntos que se encuentren en el interior del Sistema.
- *Global*: Permite determinar que variables termodinámicas serán tenidas en cuenta en el análisis como por ejemplo la radiación.
- *Ambients*: Permite establecer las condiciones del ambiente, entendiendo por ambiente el fluido que rodea al nuestro modelo. El ambiente no necesitará declarar un lugar ya que todo lo que no sea modelo geométrico, Flotherm® lo

considerará ambiente e interactuará con él

- *Gravity*: Se utilizará para indicar el módulo y sentido del vector gravedad en el caso que se considere incluir en el modelo. De esta decisión dependerá la existencia o no de convección natural.
- *Fluid*: Permite establecer las condiciones del único fluido (aparte del ambiente) que es capaz de manejar Flotherm[®]. Pueden declararse un elevado número de fluidos para manejar una lista con la que poder correr diferentes casos seleccionando uno u otro, sin embargo solamente se podrá introducir uno de ellos que se empleará a modo de fluido de refrigeración. Se debe notar que esto es así porque, como ya se ha explicado, Flotherm[®] no es un programa genérico de fluidos, sino que se encuentra específicamente adaptado para el tratamiento de electrónica no siendo necesario en este caso manejar más de un fluido al mismo tiempo con la consiguiente complejidad que ello aporta al análisis.

F. Root Assembly: Se trata de una estructura en forma de árbol sobre la que cuelgan todos los elementos que componen el modelo, ya sean ventiladores, disipadores, rejillas o simplemente cuboides a partir de los cuales se ha modelado una geometría mayor. Dentro de este “árbol” se pueden generar otros “Root Assembly” de nivel inferior al anterior para generar agrupaciones de elementos que permitan organizar la estructura de los mismos.

G. Panel de componentes: Contiene los iconos para añadir cualquier elemento que se necesite en el sistema: Ventiladores, Disipadores, Flujos constantes, Cuboides,...

H. Botón para iniciar la resolución del modelo o, en el caso de que exista un trabajo en curso detenido, se reanudará el nuevo caso de carga partiendo de la solución previa existente.

I. Panel de control superior: Permite tener acceso a las opciones avanzadas y a otros comandos importantes que ya se han explicado por tener icono.

3.2 ANSYS®

Tal y como se explicó en el capítulo de introducción, una parte de este proyecto consiste en el diseño de las boquillas de salida del distribuidor que alimenta de refrigerante a los Plank, además del análisis del mismo para verificar:

- ⤴ Que el reparto de refrigerante es el óptimo entre todos los Plank, de forma que cada uno reciba el caudal que le corresponde.
- ⤴ Que se cumplen las condiciones de caída de presión impuestas en la especificación.

Para completar con éxito esta tarea se ha optado por el empleo de una herramienta llamada CFX® que se encuentra integrada en el paquete ANSYS® Workbench, producido y distribuido por la empresa ANSYS. Inicialmente se comenzó en trabajo en la versión 12.1, sin embargo, en el transcurso del mismo, fue lanzada la versión 13.0 del mismo con numerosas mejoras de estabilidad y rendimiento que se decidieron aprovechar.

Por este motivo, todos los modelos que se habían generado en la versión 12.1 de ANSYS se importaron a la versión 13.0 en la que se concluyeron con éxito las tareas pendientes.



Fig. 26: Imagen de presentación de ANSYS® 13.0

ANSYS® Workbench, como su propio nombre indica en Inglés, es un banco de trabajo que agrupa todas las herramientas dedicadas al análisis por elementos finitos (FEM) que durante años ha desarrollado la empresa de software ANSYS®.

El principal objetivo de este tipo de herramientas es el análisis de sistemas (no en vano, de ahí proviene el nombre AN-SYS) cuyas geometrías y condiciones de contorno poseen tal

nivel complejidad, que resultaría imposible obtener unos resultados fiables mediante el cálculo analítico tradicional resultando muy oportuno recurrir al cálculo computacional.

Una vez abierto el programa teniendo cargado uno de los casos que nos ocupa, el aspecto del mismo será el mostrado en la siguiente imagen en la que además se han remarcado las zonas de interés:

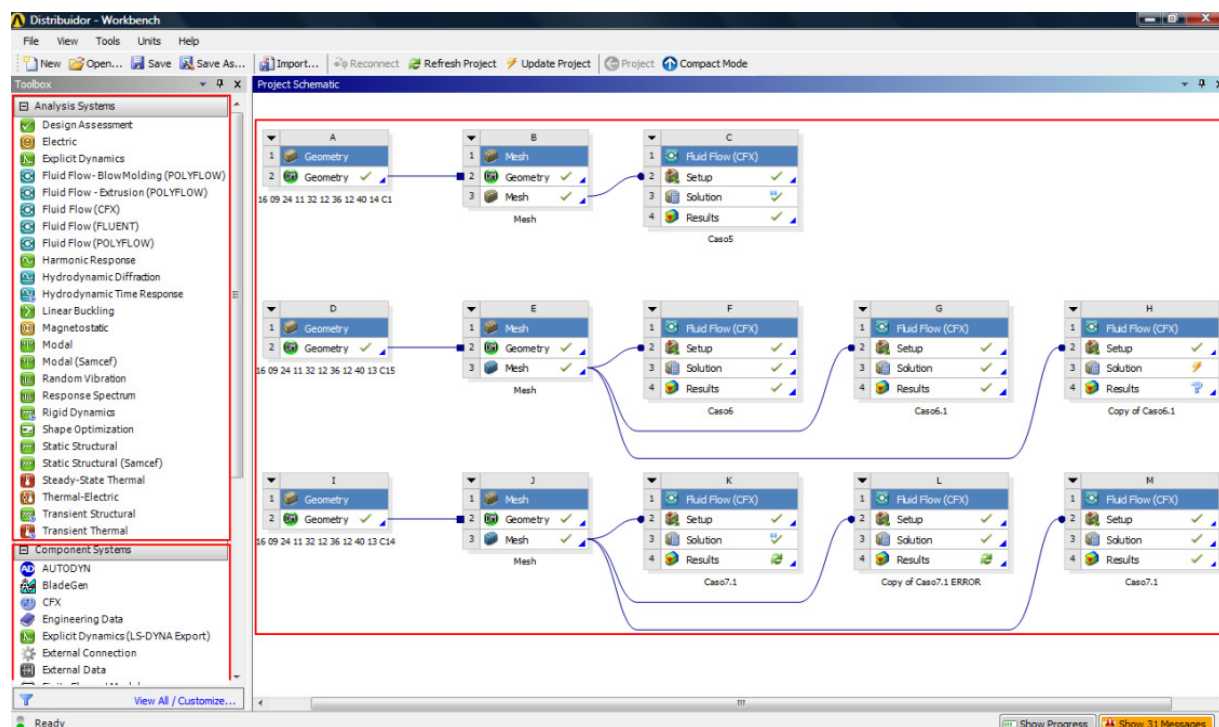


Fig. 27: Ventana principal de Workbench

- ▲ En la zona superior izquierda recuadrada encontramos los distintos módulos de resolución que incorpora ANSYS® Workbench siguiendo el siguiente código de colores:
 - Verde para los análisis estructurales
 - Rojo para los térmicos
 - Azul para los análisis de fluidos
 - Naranja para los eléctricos y magnéticos
- ▲ En la zona inferior izquierda se encuentran los distintos módulos de apoyo al análisis. El objetivo de estos paquetes no es estudiar sistemas y obtener resultados como en el caso anterior, sino servir de suplemento a los mismos. Entre ellos podemos encontrar:
 - Herramientas de CAD
 - Herramientas de simplificación de geometrías
 - Herramientas de mallado
- ▲ En la parte central derecha se encuentra el área de trabajo de ANSYS Workbench®. En

esta zona podremos organizar y esquematizar el trabajo arrastrando los módulos situados en la zona izquierda y soltándolos (operación de “*Drag and Drop*”). Esta forma de organización del trabajo nos permitirá entender los pasos que se han dado y los casos que se han ejecutado hasta llegar a la situación de análisis y resolución actual con relativamente poco esfuerzo (siempre resulta más agradable el trabajo en un entorno visual en el que los casos resueltos se representan por cajas que recurrir a una clásica vista de lista de ficheros y carpetas). En el caso que nos ocupa, la organización general del trabajo será la siguiente:

- En la parte izquierda de esta zona se encuentran los módulos *geométricos*, de los que cabe destacar las siguientes características:
 - ⤴ Cada uno de estos módulos es único, puesto que no tiene sentido analizar más de una vez una misma geometría.
 - ⤴ No existen flechas que lleguen a estos módulos puesto que el proceso de análisis por FEM siempre comienza por la declaración de la geometría a analizar.
 - ⤴ De cada módulo geométrico saldrán una o varias flechas y siempre hacia módulos de mallado puesto que:
 - Resulta imprescindible pasar por el proceso de mallado ya que en análisis por FEM, la geometría no contiene información necesaria para el módulo de resolución. Se trata de una guía para que al módulo de mallado le sirva de referencia para colocar los nodos que componen la malla.
 - Puede interesar analizar una geometría con diferentes tipos de malla o distinto tamaño de los elementos que la componen.
- En la zona central se encuentran los módulos de *mallado* de los que cabe destacar las siguientes características:
 - ⤴ A cada módulo de mallado le llega una única flecha procedente de un módulo geométrico.
 - ⤴ De cada módulo de mallado tiene que salir al menos una flecha que debe dirigirse a un módulo de resolución.
 - ⤴ El número de flechas que puede salir de un módulo de mallado es ilimitado puesto que puede ser interesante resolver una misma malla aplicando sobre la misma diferentes:
 - Materiales.
 - Condiciones de contorno.
 - Acciones.
 - Etc.

- A la derecha de los módulos de mallado se encuentran los módulos de análisis de fluidos *CFX*[®] siendo sus principales características:
 - A cada uno de estos módulos llega una única flecha procedente de un módulo de mallado.
 - De estos módulos no sale ninguna flecha por tratarse del final del recorrido ya que, en este caso y como se puede ver en la imagen superior, *CFX*[®] está compuesto por los siguientes sub-módulos:
 - *Setup*: Se trata de la herramienta de pre-procesado de *CFX*[®].
 - *Solution*: Es el solver que recibe la información relativa a la malla y sus condiciones de contorno. Se encarga de generar el fichero de resultados y transmitirlo al módulo de post-proceso de información.
 - *Results*: Es un módulo dedicado a la extracción de información a partir de los resultados generados en el apartado anterior.

3.2.1 El módulo geométrico (Desing Modeller)

Se trata de una herramienta de CAD (Computer Aided Desing) que incorpora el paquete *ANSYS*[®] Workbench. El aspecto que tiene la herramienta es el siguiente:

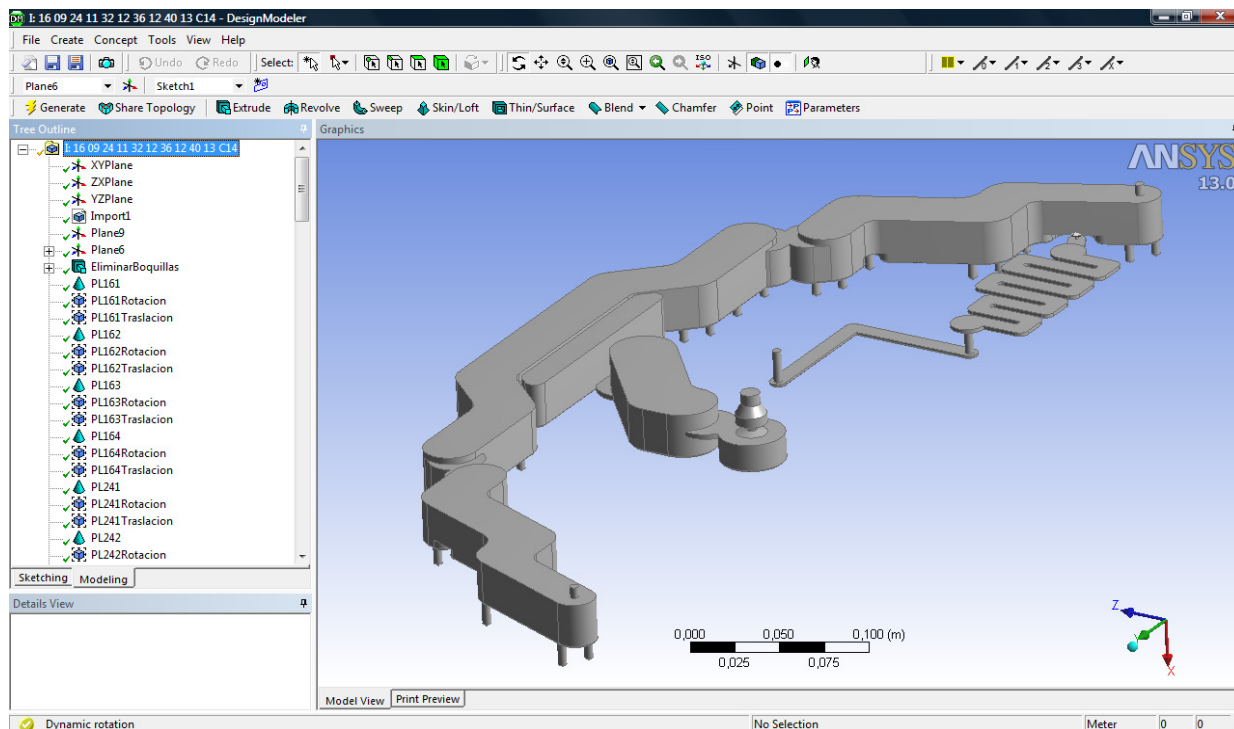


Fig. 28: Desing Modeller

En la Figura 28, podemos apreciar las siguientes áreas que componen el diseño del programa:

- ⤴ En la zona superior encontramos una barra alargada con algunas de las operaciones geométricas disponibles además de los comandos típicos de cualquier SO para el manejo de ficheros.
- ⤴ En la parte izquierda de la imagen, podemos observar la lista de tareas de carácter vectorial que se han realizado hasta encontrarnos en el instante actual del diseño.
- ⤴ En la zona central derecha se encuentra el área principal de trabajo que en cualquier instante muestra el estado actual del conjunto, la regla con la escala espacial y los ejes globales del sistema

Los principales usos que recibirá una herramienta de estas características enfocada a la exportación hacia un software FEM serán:

- ⤴ Importación de geometrías provenientes de otro software de CAD.
- ⤴ Realización de modificaciones sobre las mismas.
 - Adición de información.
 - Simplificaciones geométricas:
 - Supresión de chaflanes.
 - Supresión de radios de acuerdo.
 - Eliminación de agujeros para tornillos.
 - ⤴ Supresión de avellanados.
 - Borrado de grabados.
 - Etc.

3.2.2 El módulo de mallado (Mesh)

Se trata de una herramienta imprescindible en cualquier software dedicado al FEM. Normalmente este es un módulo viene integrado dentro de la propia herramienta de resolución pero al crecer el número de las mismas dentro del paquete ANSYS® Workbench se encontró que no tenía mucho sentido tener una herramienta repetida varias veces a lo largo del paquete por lo que se decidió unificar el mallado de geometrías en una aplicación externa pero integrada dentro de ANSYS® Workbench que diera servicio a todas las demás. El aspecto que tiene la

herramienta es el siguiente:

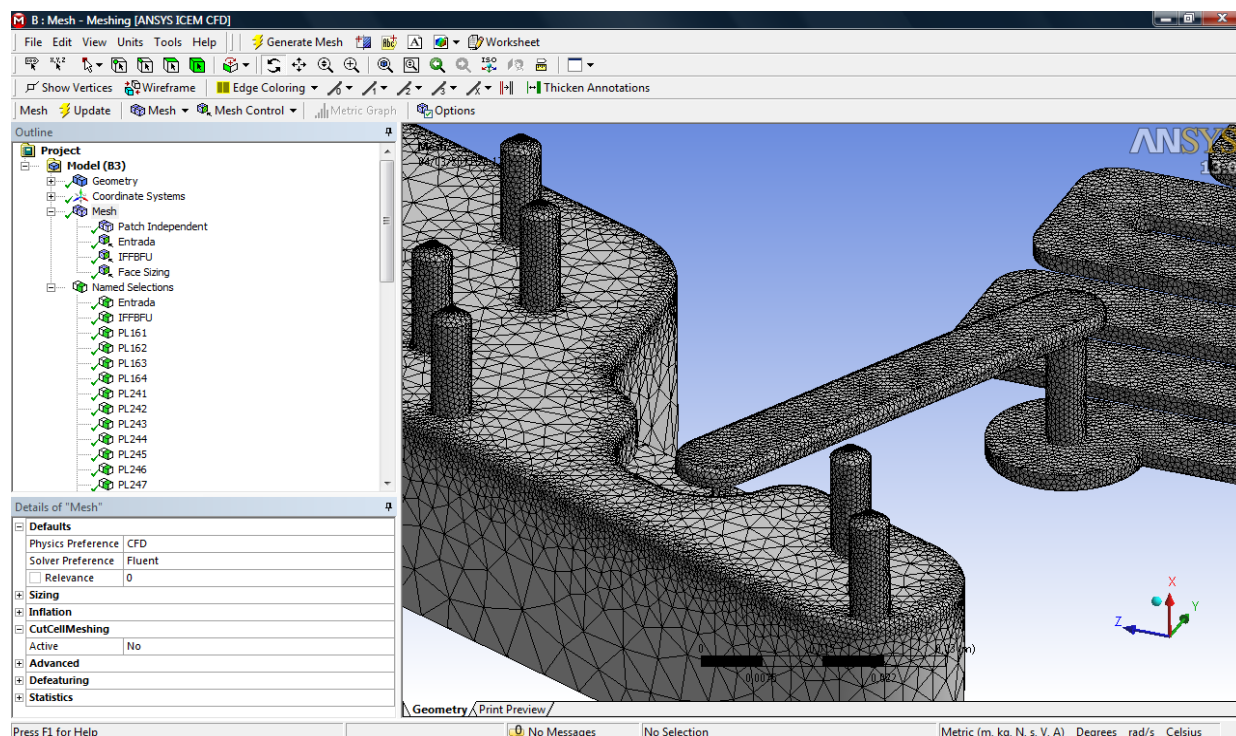


Fig. 29: Módulo de mallado (Mesh)

Como se puede apreciar en la imagen de la Figura 29, la estructura de ventanas es casi idéntica a la que encontramos en el módulo de diseño y a la que encontraremos en los módulos de resolución y post-proceso con el fin de que el Ingeniero encuentre un aprendizaje más rápido y un trabajo con las distintas herramientas más cómodo.

- ▲ En la parte superior izquierda encontramos la lista de instrucciones que se han proporcionado al programa para que éste genere una malla de acuerdo a nuestras necesidades. Entre estas tareas, las más importantes son:
 - Selección del tipo de elemento:
 - ▲ Tetraedros: Se consigue una malla que fácilmente se adapta a cualquier geometría, por compleja que esta sea.
 - ▲ Hexaedros: Dificilmente se ajustan a la geometría, pero en caso de hacerlo, se consigue una malla con un bajo número de elementos que proporciona tiempos de convergencia mínimos.
 - Tamaño máximo de elemento: Una malla excesivamente grosera puede arrojar resultados de dudosa exactitud e incluso provocar problemas de convergencia. En la práctica, tendremos que encontrar un compromiso entre precisión en los resultados y tiempo de resolución. Una técnica muy común y que se empleará en este proyecto, será la de utilizar distintos tipos de tamaño de malla en función de si la zona resulta

de interés o no ya que, de marcar un mismo tamaño máximo para toda la malla, podemos encontrar problemas como el siguiente:

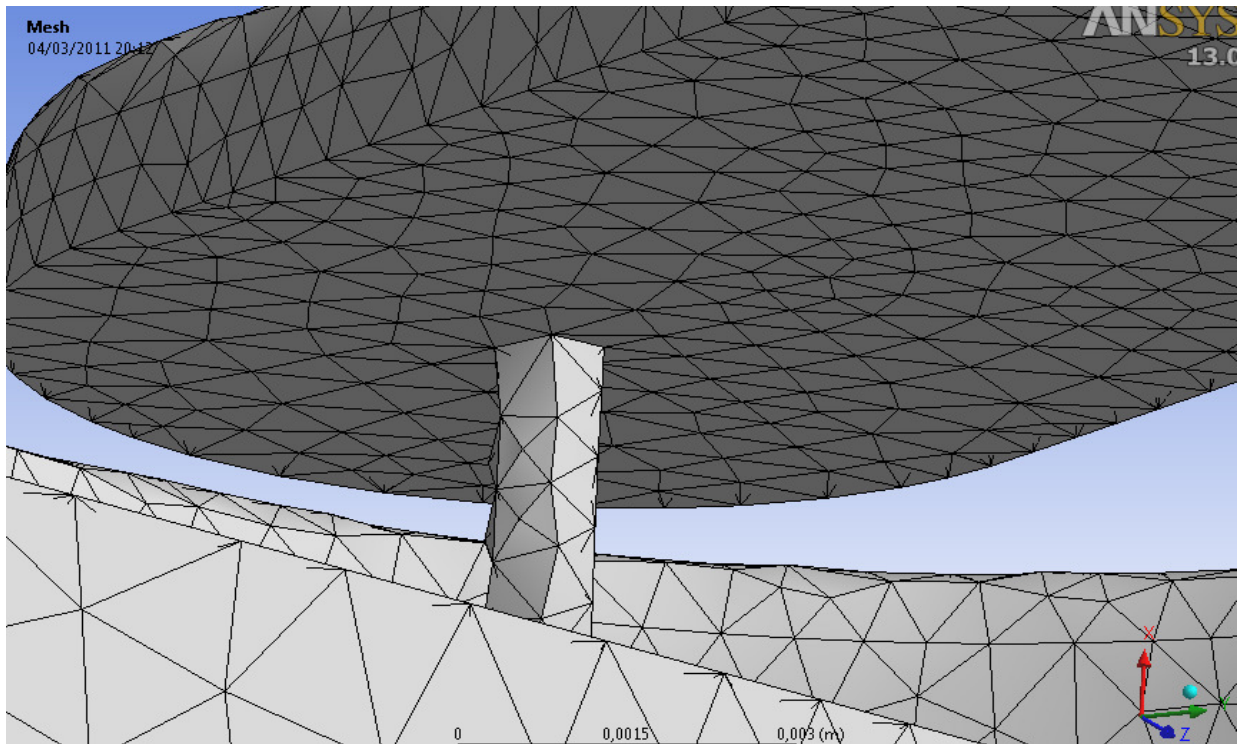


Fig. 30: Mallado grueso en el conector con la IFFBFU

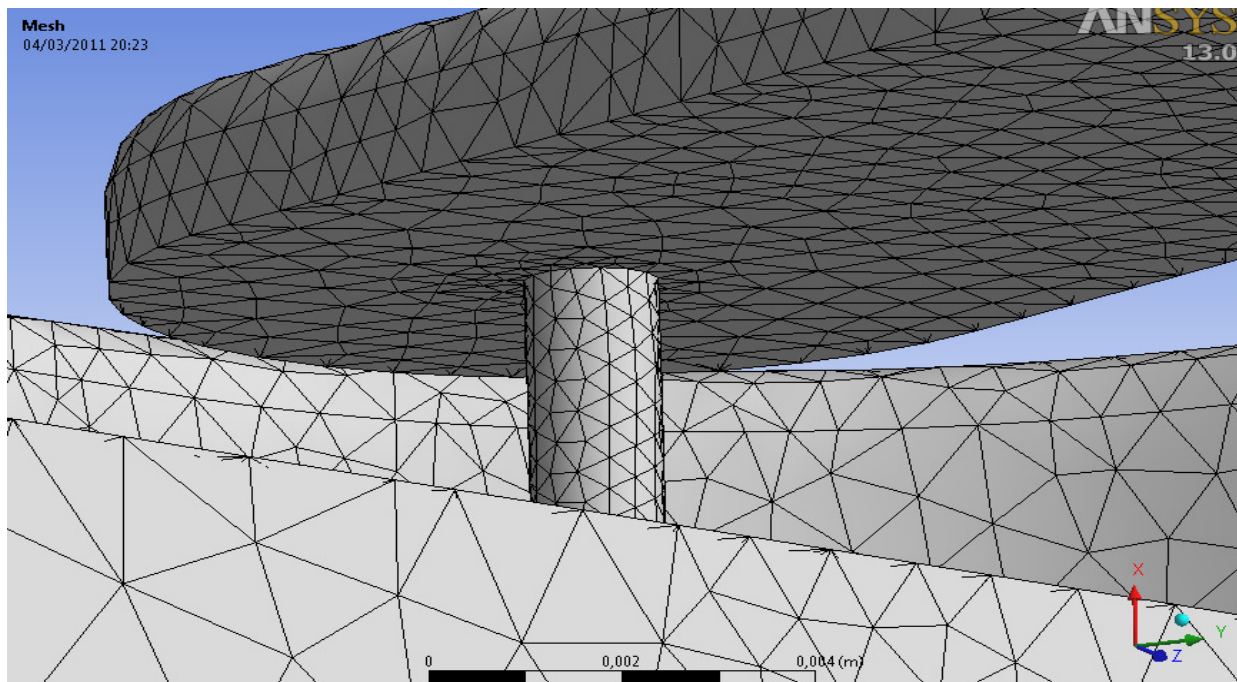


Fig. 31: Mallado fino en el conector con la IFFBFU

Como se puede apreciar, en las figuras 30 y 31 se muestra el cilindro que conecta el distribuidor con el módulo IFFBFU. En el primer caso, éste dista mucho de mantener su forma, mientras que en el segundo, ésta se encuentra bien definida pese a que ambos mallados tienen el mismo tamaño máximo de elemento general (nótese esto último en el tamaño de los elementos del resto de la malla). Esto es así porque en el segundo caso, en el módulo de mallado se ha especificado el máximo tamaño de elemento que se desea tener localizado únicamente en dicha geometría.

- Ángulo mínimo de elemento: Una malla que contiene elementos con ángulos entre nodos pequeños (en el argot FEM a los elementos con ángulos $< 18^\circ$ se les denomina “filos de cuchillo”) suele producir problemas de convergencia.
 - Tamaño mínimo de elemento: Una malla con un tamaño de elementos por defecto excesivamente pequeño puede producir que su número sea muy elevado, lo cual provocaría unos resultados excesivamente precisos en zonas de bajo interés y, al mismo tiempo, unos tiempos de resolución de tal orden que en la práctica sea imposible de resolver con las CPU actuales.
- ▲ La parte inferior izquierda será la que nos permita consultar y modificar todos los campos de los elementos que se han introducido en la parte superior de la misma, así como consultar todos los parámetros relacionados con la malla.
 - ▲ Por último, al igual que en el módulo geométrico, en la parte central encontramos el área de trabajo que nos mostrará en tiempo real el estado de la malla.

3.2.3 CFX[®]

A diferencia de los módulos de ANSYS[®] Workbench explicados hasta ahora, este sí se encuentra dedicado al análisis, más concretamente, al estudio de sistemas térmicos y fluido-dinámicos como es el caso que nos ocupa.

Como se puede apreciar en la Figura 32, CFX[®] divide el área de trabajo en dos partes:

- ▲ La zona de la izquierda es el árbol de trabajo. Se trata de un esquema que representa toda la información que hay que introducir al programa en caso que sea necesaria para que este resuelva correctamente. Para ello, toda la información se encuentra ordenada de arriba hacia abajo según importancia y orden en el que los parámetros se aconseja que sean introducidos. Este árbol puede verse con más detalle en la Figura 32.

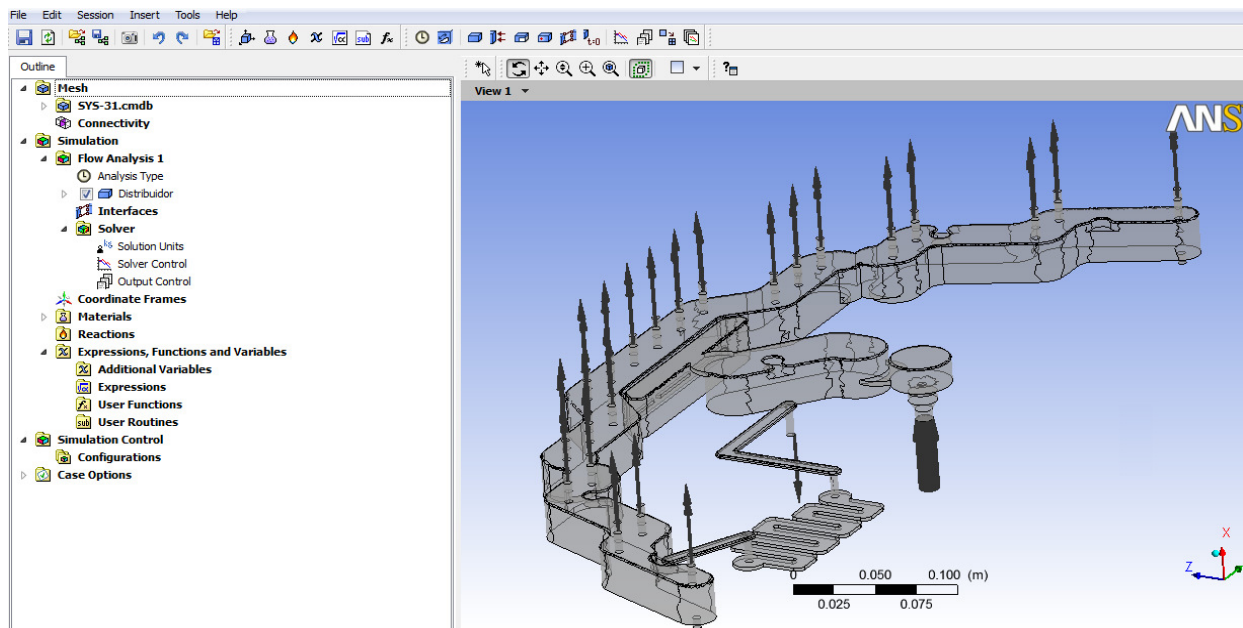


Fig. 32: Ventana principal del módulo CFX®

- La zona de la derecha mostrará el estado del sistema de forma que podamos seguir en tiempo real las modificaciones que se introduzcan en el árbol de trabajo. Por ejemplo, cada vez que se establece una condición de contorno de entrada de fluido al sistema aparece una flecha apuntando hacia dentro del mismo en el área que se ha especificado que esto debe ocurrir. De forma análoga ocurre con las condiciones de contorno de salida, entradas de calor, etc. (Figura 33).

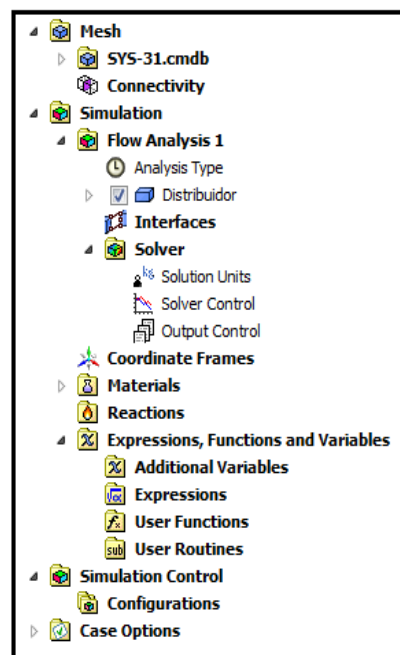


Fig. 33: Esquema de trabajo en CFX®

3.3 LibreOffice (3.3.0)

Consiste en una suite de trabajo ofimático cuya filosofía de trabajo es muy similar a la que ofrece Microsoft Office® con la principal diferencia de que LibreOffice es un paquete de software libre, por lo que el código es abierto y nadie tiene derecho a lucrarse con dicha herramienta, que cualquiera puede descargar de forma gratuita en la web oficial: <http://libreoffice.org/>

Los módulos que se han utilizado para la realización de este proyecto son

- Writer: Procesador de texto que se ha empleado en la escritura de este documento.
- Calc: Hoja de cálculo empleada para la obtención de la mayor parte de las tablas, cálculos y gráficas que acompañan a este documento.
- Math: Editor de fórmulas con el que se han escrito las ecuaciones que se pueden leer en este mismo documento.
- Impress: Editor y presentador de diapositivas que se ha empleado para diseñar el documento que acompañará a la exposición oral el día de la lectura del Proyecto.

4. Modelado del Sistema

4.1 Los TRM

El tratamiento del modelado que recibirán tanto los TRM como los módulos Plank será completamente diferente al que se podrá observar en el Distribuidor-Colector. Esta diferencia es causada por las diferencias de funcionamiento entre los programas que se emplearán para modelar y resolver, por un lado el conjunto Plank+TRM y por otro el Distribuidor-Colector (recordemos que se empleará Flotherm[®] para en el primer caso y CFX[®] en el segundo).

Para el modelado de los TRM se optó por reproducir el 100% de la geometría de los mismos, capa por capa mediante elementos de tipo “cuboide” mediante los cuales se conseguirá una rápida convergencia y un mallado uniforme. Recordemos la configuración de las capas que componen un módulo TRM (Figura 34).

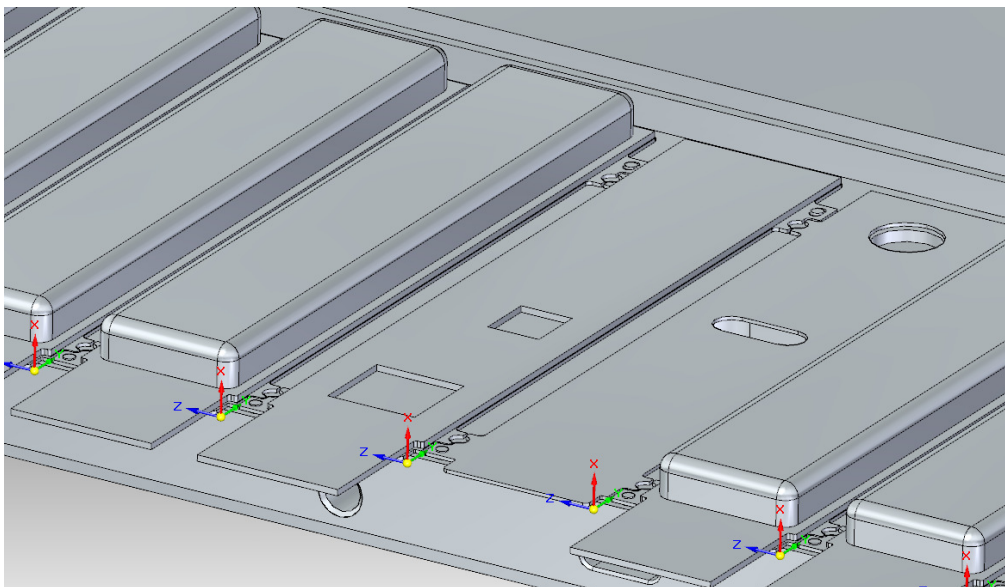


Fig. 34: Distribución de capas en un TRM

- La primera capa simulará el “Baseplate” de los módulos TRM y se construirá mediante un único cuboide que ocupe la superficie correspondiente que se muestra en la Figura 35.

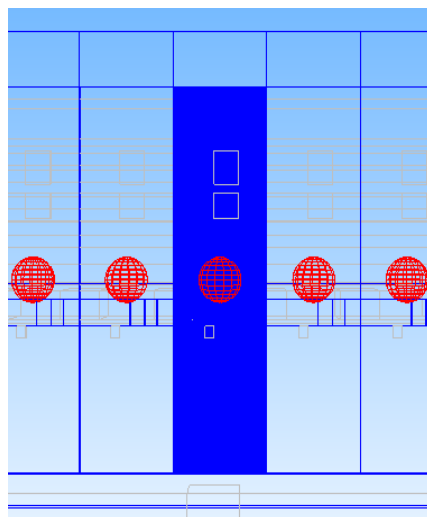


Fig. 35: Modelado del “Baseplate”

- La segunda capa (Figura 37) simulará el “Plate” o circuito sobre el que se montará la electrónica. Como ya se explicó en la descripción del elemento, esta capa posee dos agujeros rectangulares sobre los que se montarán los componentes HPA1 y HPA2. Para la construcción de este modelo se generarán 4 cuboides que dejarán un único orificio en su interior sobre el que se generarán, también mediante cuboides, dichos componentes electrónicos. El motivo de hacerlo de este modo radica en la simplicidad del mallado obtenido ya que Flotherm[®] es un programa de elementos finitos del tipo “mallado por defecto”, es decir, que el programa generará una malla en todo momento para cada cambio que se realice en la geometría, de forma que aprovechará todas las líneas de separación entre objetos para generar división de elementos, por lo que, en el caso de existir dos elementos muy próximos entre sí, se generará una malla excesivamente fina localizada en dicha sección, lo cual romperá la uniformidad de la misma y generará problemas de convergencia. Este efecto se puede apreciar en las líneas negras gruesas de la Figura 36.

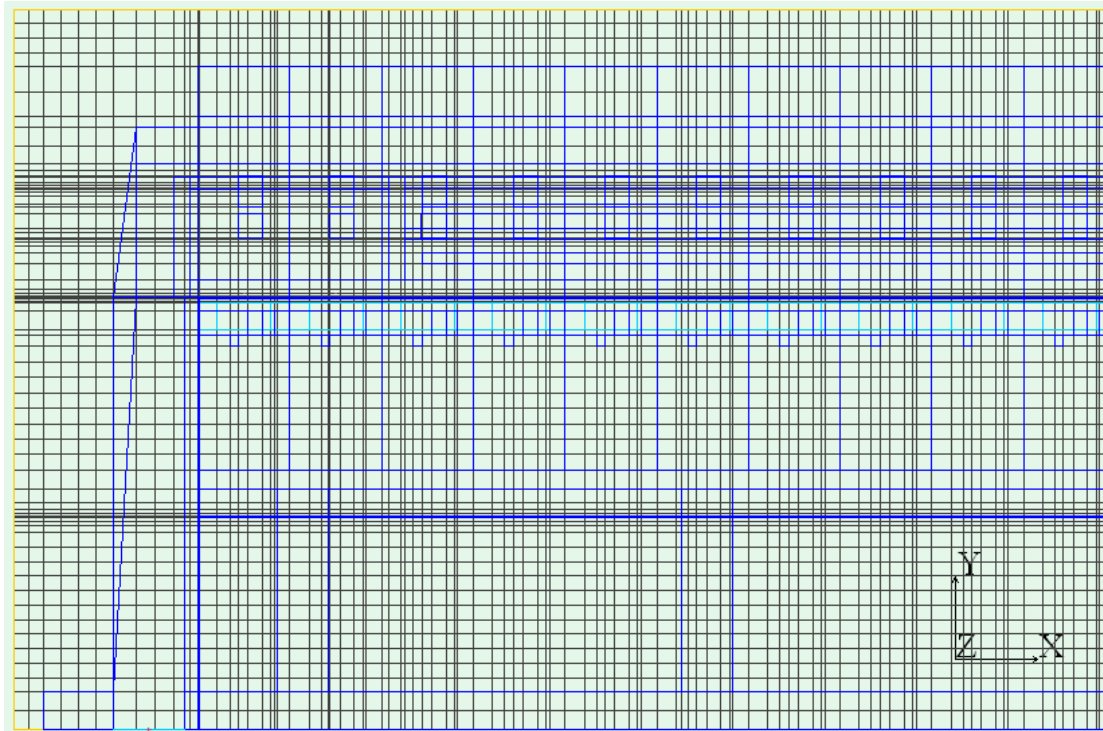


Fig. 36: Concentraciones locales de malla

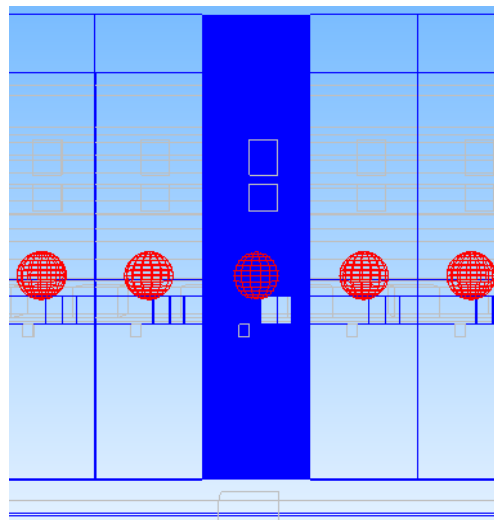


Fig. 37: Modelado del "Plate"

- La tercera capa será la correspondiente a la electrónica. Al tratarse de componentes distintos, cada uno de ellos tiene diferente geometría en sus 3 dimensiones. El modelado de la geometría correspondiente a las direcciones X e Y se hará fiel a la realidad (salvo el caso de los HPA como se explicó en el punto anterior), sin embargo, todos los componentes se modelarán con 1mm en dirección perpendicular para evitar que se produzca el efecto de la distorsión de malla que se explicó en el caso del "Plate" en la dirección del eje "Z".

- ▲ Por último, centrado en el Baseplate se generará un “Monitor Point” del que nos valdremos para obtener información de la temperatura en el mismo y que se puede observar en el modelo representado mediante una esfera roja. El modelado final del conjunto del TRM es el que se puede observar en la Figura 38:

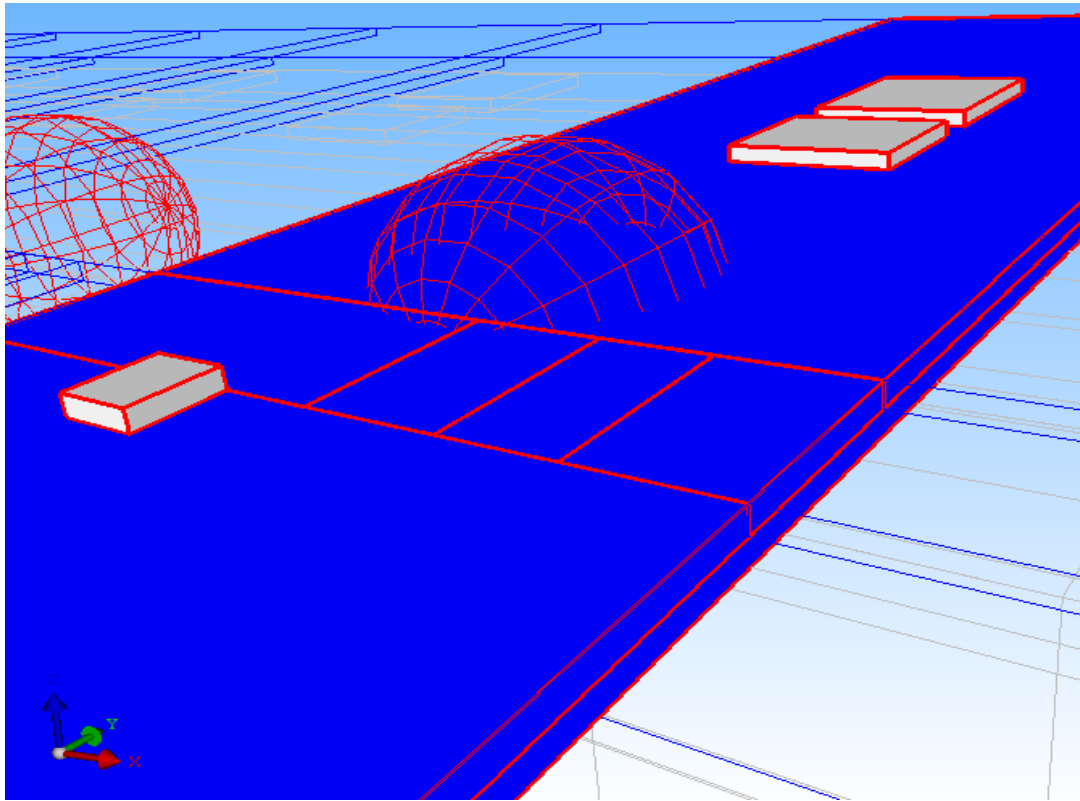


Fig. 38: Modelado final del TRM

4.2 Los Plank

Para el modelado de los Plank en Flotherm[®], se emplearán elementos tanto de tipo “cuboide” como de tipo prisma. El modelo se construirá en 5 fases:

1. **Tapa trasera:** Se compone de todos los cuboides necesarios para cerrar el modelo por la parte contraria sobre la que se encuentran situados los Plank. Este conjunto de elementos y el aspecto final que confieren a la tapa se pueden apreciar en la Figura 39:

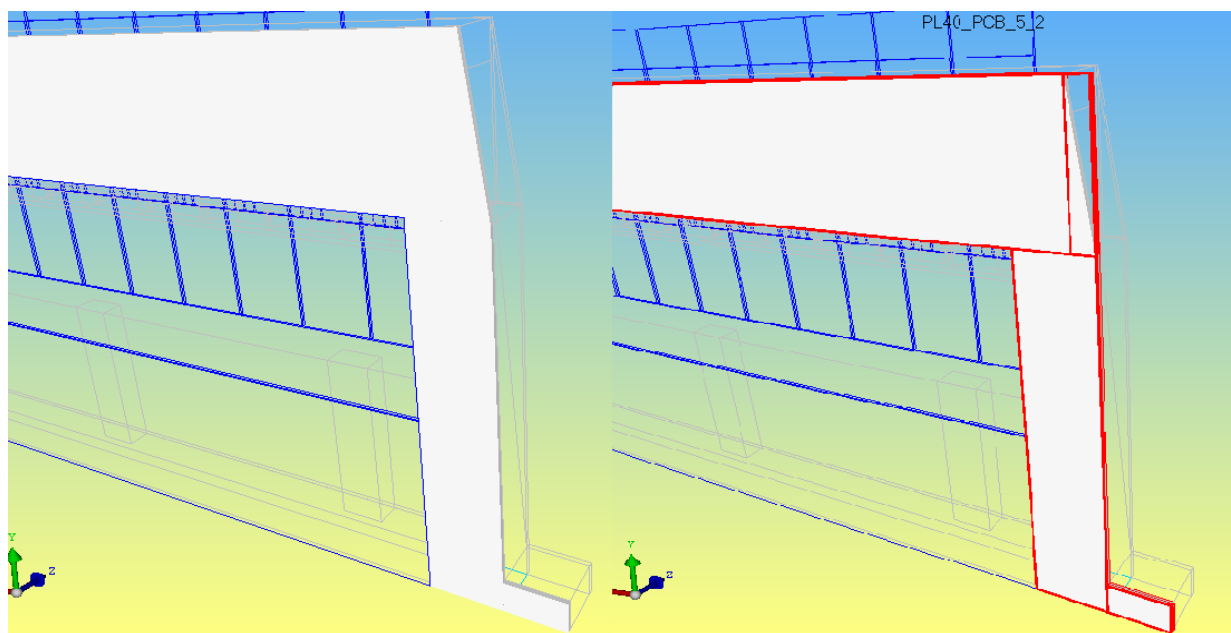


Fig. 39: Modelado de la tapa trasera del Plank

2. **Tapa delantera:** Se compone de los cuboides necesarios para cerrar el circuito por la cara en la que se encuentran situados los TRM teniendo en cuenta que serán estos los que cierren la parte del circuito sobre la que se encuentra situados, por lo que esta tapadera se limitará a cerrar los conductos de entrada y salida de fluido al Plank. El aspecto final que tendrá esta zona del circuito será el representado en la Figura 40:

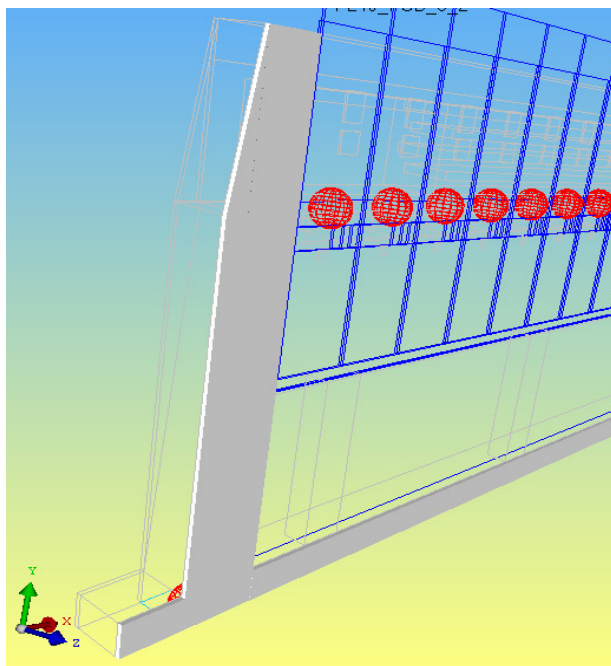


Fig. 40: Tapa delantera del circuito

3. **Chasis:** Es el principal conjunto de cuantos componen el Plank ya que mediante el mismo se representa tanto la estructura del Plank (base, pilares, asiento de los TRM,...) como los canales por los que fluirá el refrigerante. El aspecto que tiene esta parte del modelo es el que se puede apreciar en la siguiente imagen:

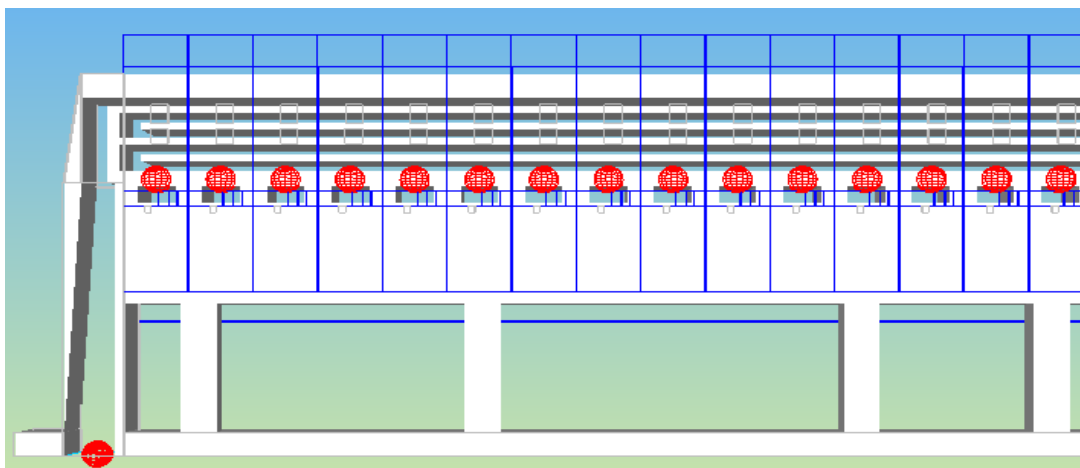


Fig. 41: Modelado del Chasis

4. **“Fixed Flow”:** La herramienta de trabajo Flotherm[®], es capaz de introducir fluido al sistema de dos maneras diferentes, mediante un ventilador y un “Fixed Flow”. En ambos casos, el caudal se puede introducir mediante el promedio de la velocidad en dicha sección, sin embargo, en el caso de un ventilador, el flujo entra simulando la turbulencia

propia del sistema que representa, cosa que no ocurre en nuestro caso. En el caso de emplear un “Fixed Flow”, como su propio nombre indica, el sistema recibirá una cantidad constante de fluido proveniente de una sección fijada de antemano. Esta segunda opción suele ser la indicada para líquidos pertenecientes al circuito de refrigeración. El aspecto que tendrá el modelado del mismo será el de una superficie de color azul verdoso cuya componente “Z” en el “Drawing Board” será la que indique el sentido del flujo (Figura 42).

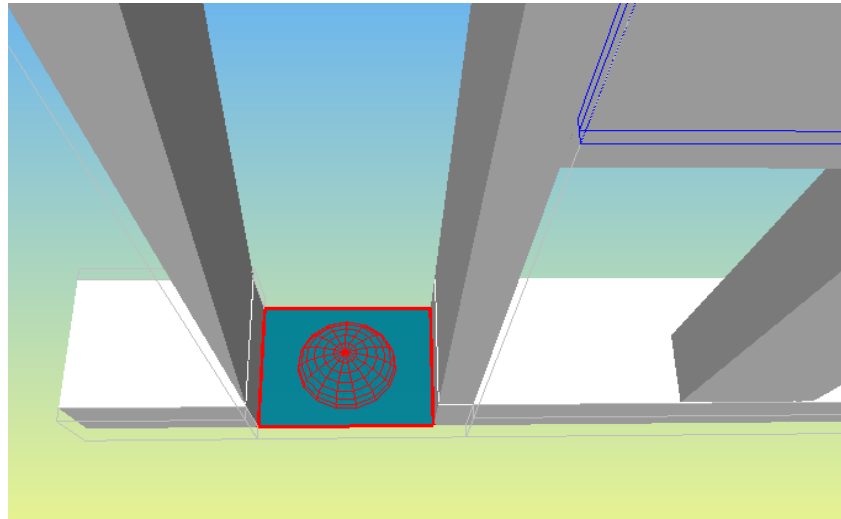


Fig. 42: Modelado del “Fixed Flow”

5. **PCB:** La información de la que se dispone de la PCB controladora de los TRM que se ubica completamente en la parte inferior de los Plank es reducida, puesto que los derechos de diseño y explotación los posee otra empresa que ha facilitado la siguiente información para que se pueda efectuar el modelado de las tarjetas en este análisis térmico:
 - La conducción de calor a lo largo de las tarjetas no es la misma en todas sus direcciones, siendo de idéntico valor en las direcciones que definen el plano de la misma y menor en la dirección normal.
 - La distribución de la potencia de los elementos en la dirección del eje “Y” no es uniforme siendo generado el 55% de la misma en la mitad superior y el resto en la mitad inferior de la misma como se explica en gráfico de la Figura 43:

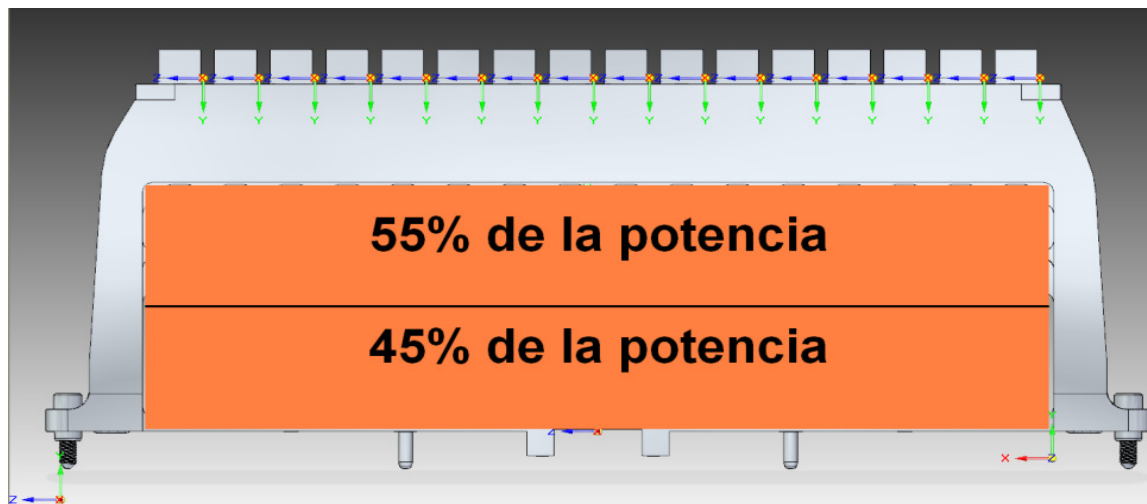


Fig. 43: Distribución de potencia en las PCB

- La zona de contacto de la PCB con el Plank se limitará a la áreas marcadas en rojo en el gráfico de la Figura 44 concretando que no existe contacto alguno con áreas que se encuentren en posición vertical:

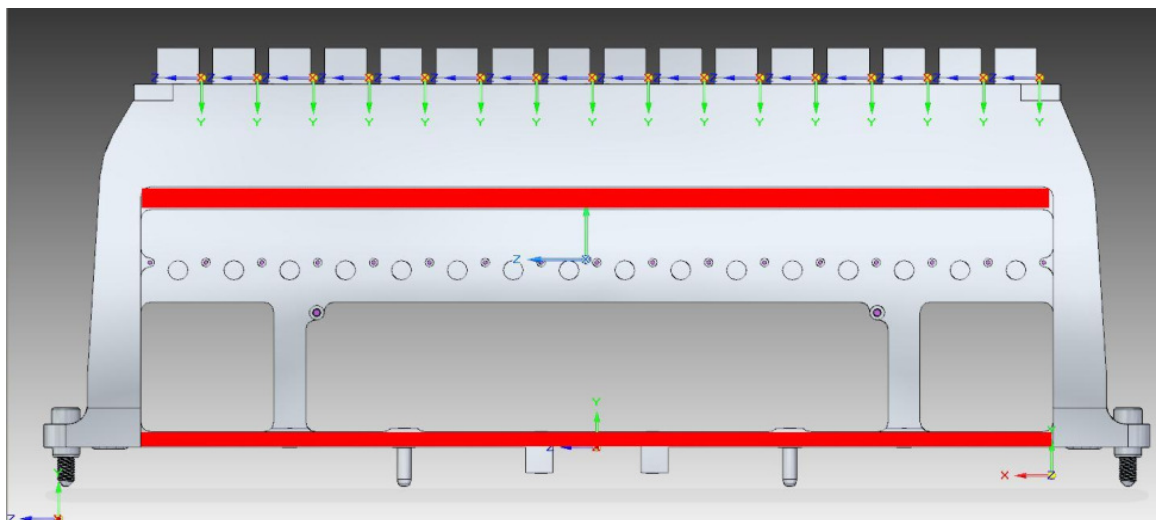


Fig. 44: Zonas de contacto entre las PCB y sus respectivos Plank

El resumen de los comentarios acerca de las propiedades y condiciones de contorno que definen el punto de trabajo de las PCB puede resumirse en la siguiente tabla:

Tabla 4: Resumen de características de la PCB

Kx [W/m·K]	35
Ky [W/m·K]	35
Kz [W/m·K]	1
Potencia [W]	15W/16TRM
Reparto de Pot.	55% contacto sup.
	45% contacto inf.

Con el fin de generar un modelo que represente lo más fielmente posible estas condiciones de trabajo, se optó por dividir la PCB longitudinalmente en dos cuboides de idéntica geometría pero con diferentes potencias asociadas manteniendo la distribución impuesta. Además, para respetar las zonas de contacto, se ha dejado un “gap” libre entre los cuboides del chasis y la PCB para que no exista transmisión de calor entre ellos así como entre las dos mitades de la PCB. Estos gap se pueden observar como líneas rojas en la Figura 45:

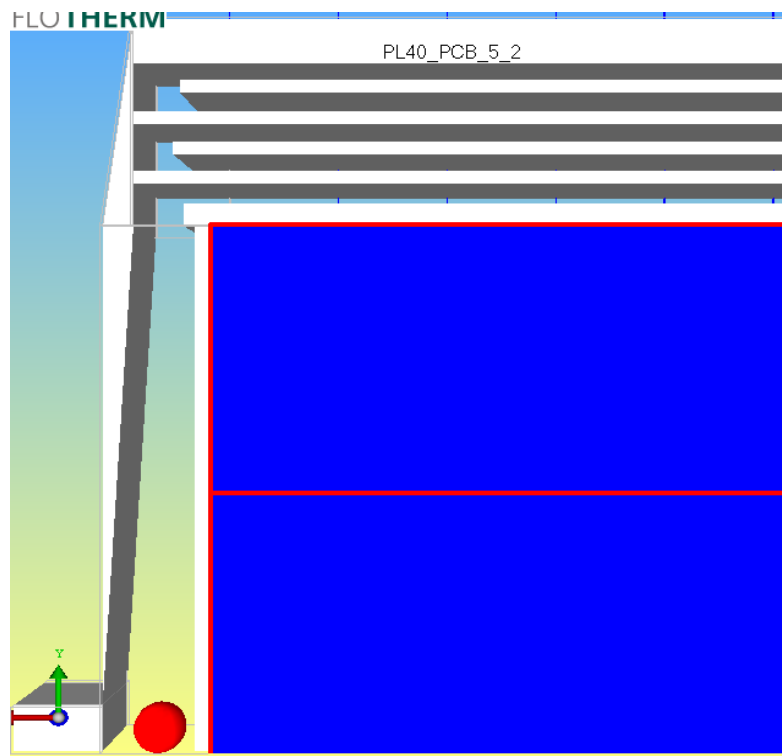


Fig. 45: Modelado de la PCB

4.3 El Distribuidor-Colector

Consiste en un plato con forma circular achatada por dos extremos diametralmente opuestos que ocupa prácticamente la totalidad del frente de la aeronave sobre la que se encuentra montada. Su misión consiste en dar soporte físico a los Plank que a su vez portan los módulos TRM así como alimentarlos en su justa medida de fluido refrigerante. La configuración de distribución de los Plank en el Distribuidor-Colector es la que se aprecia en la siguiente Figura:

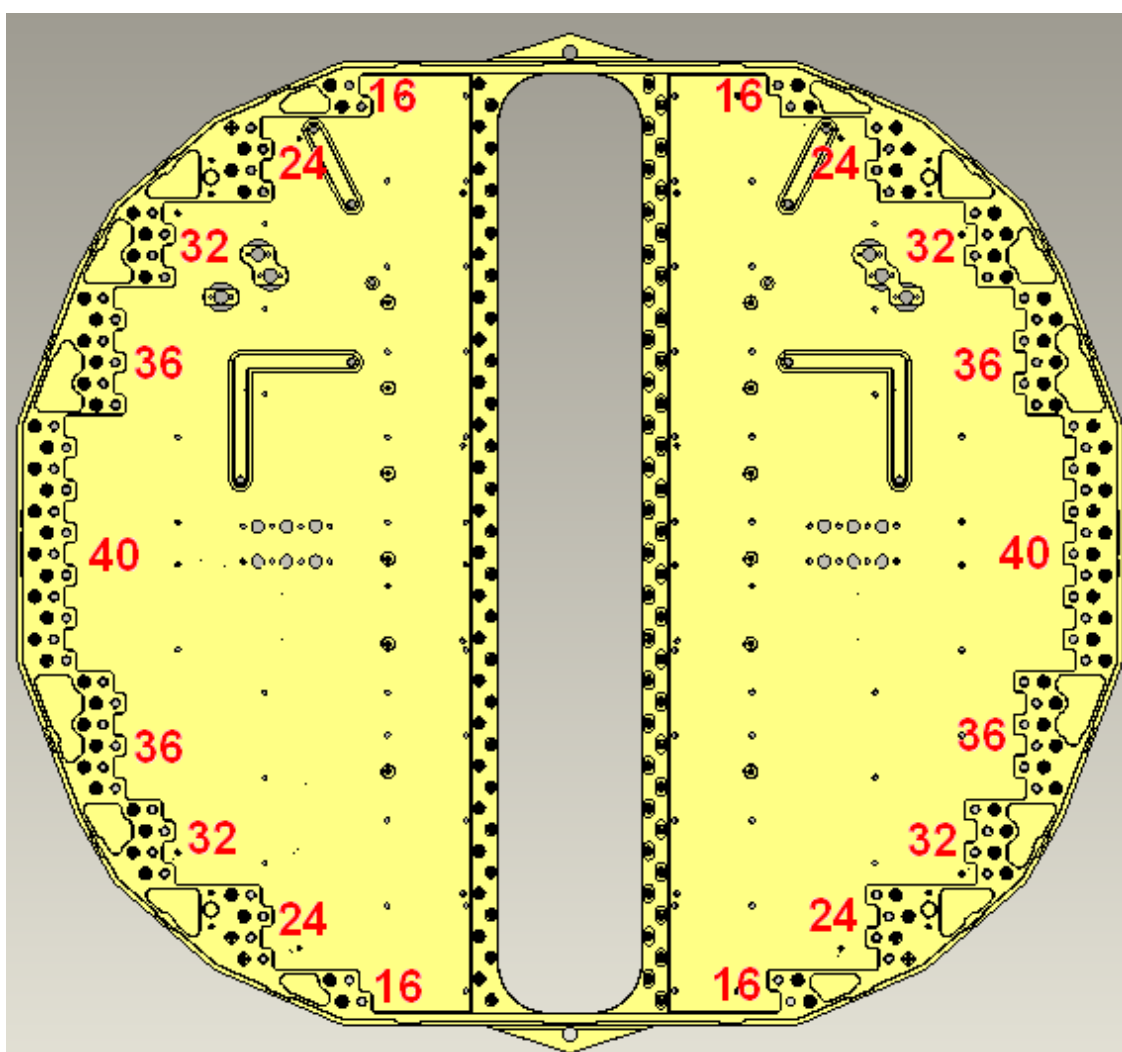


Fig. 46: Distribución de los Plank

El objetivo de esta distribución no es otro que tratar de introducir el mayor número de TRM posible en perpendicular con respecto a una sección transversal dada de la aeronave sin

incurrir en unos costes excesivos de fabricación que derivarían de un diseño basado en 44 Plank diferentes para evitar tener las pequeñas pérdidas de área que se pueden observar en la Figura 47. Por este motivo, el diseño del Distribuidor-Collector se basa en acoplar los 44 Plank agrupados en 5 módulos diferentes de los siguientes tamaños: 16, 24, 32, 36 y 40 TRM.

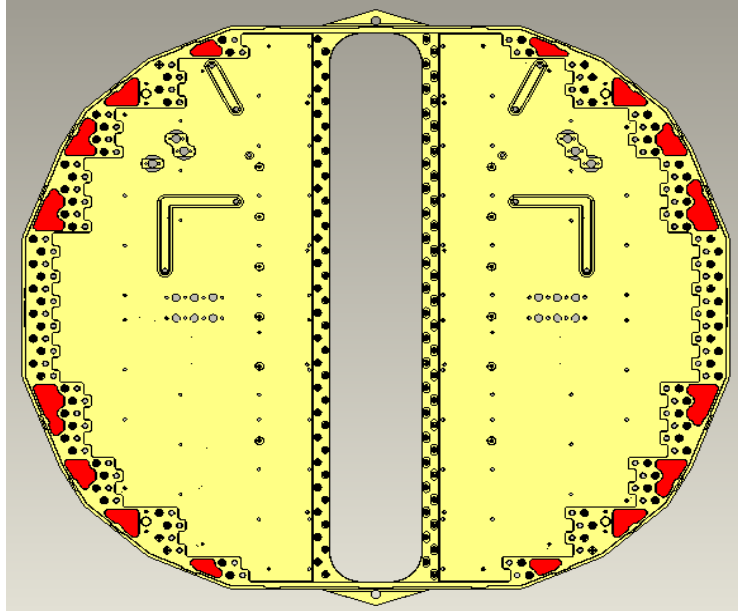


Fig. 47: Área perdida debido a la agrupación en 5 modelos de Plank

Siguiendo esta configuración, si observamos el Distribuidor-Collector por la parte trasera, encontramos que la distribución del conducto de refrigeración es la mostrada en la Figura 48:

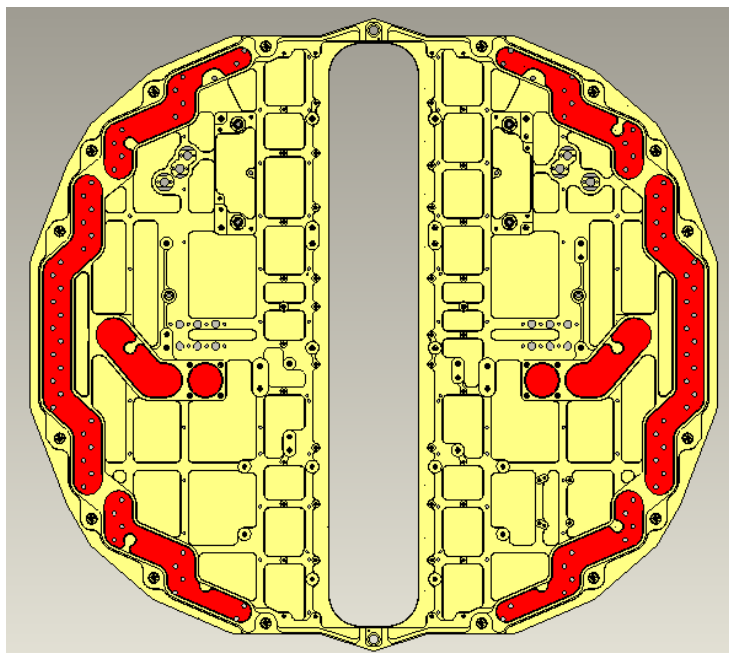


Fig. 48: Hueco por el que circulará el fluido de refrigeración

Las principales características de montaje que se pueden observar en la Figura 47 son las siguientes:

- Los Plank se montan de izquierda a derecha.
- Los agujeros que permiten ver el fondo son pasantes y están destinados a la entrada y salida de fluido a los Plank.
- Cada agujero tiene un taladro ciego en su parte exterior que sirven para roscar los tornillos que se pueden observar en la Figura y, de este modo, restringir la totalidad de los movimientos de cada Plank
- En la zona central, a cada lado del hueco rectangular con esquinas redondeadas, se puede observar unos agujeros ciegos que sirven para introducir los pasadores que incorporan cada Plank con objeto de aumentar la frecuencia natural de oscilación de cada uno de ellos y, de este modo, hacer que difiera de la frecuencia de funcionamiento del sistema.
- Todos los Plank se encuentran desfasados en horizontal la distancia correspondiente a un diámetro de entrada de fluido con el fin de no debilitar en exceso la pared entre agujeros.
- Desde un punto de vista vertical, la posición central se encuentra ocupada por los Plank de 40 TRM por ser los de mayor longitud. El resto de Plank se encuentran divididos en dos grupos de idéntico número de TRM con el objetivo de respetar la simetría del sistema.
- Además de los 44 TRM, el Distribuidor-Colector alimenta a las unidades IFF y BFU, de las cuales se posee la siguiente información:
 - ⤴ Ambas unidades se encuentran refrigeradas en serie.
 - ⤴ La unidad IFF se refrigera por pared fría, teniendo datos de la geometría exacta del canal de refrigeración.
 - ⤴ De la unidad BFU, únicamente se conoce la caída de presión que genera el paso del fluido al atravesarla en su caudal correspondiente.
 - ⤴ La geometría de este sub-sistema de refrigeración es la que se muestra en la siguiente figura:

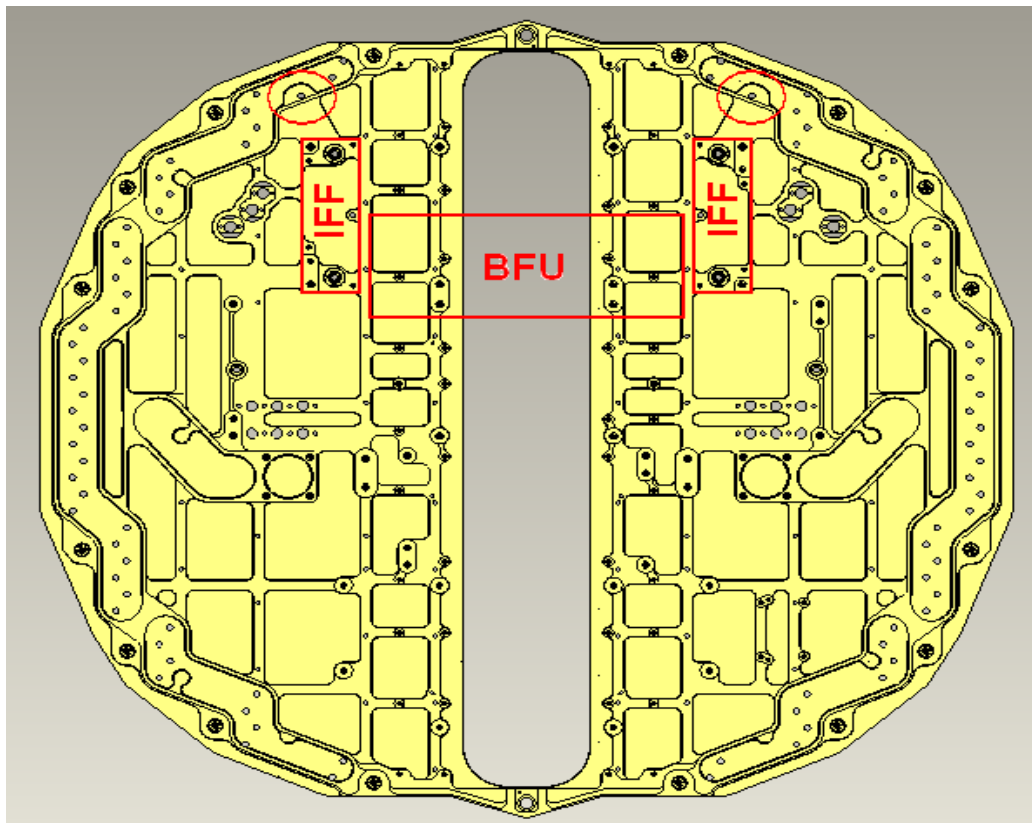


Fig. 49: Refrigeración de las unidades IFF y BFU

Donde el fluido de refrigeración se toma de la parte izquierda del Distribuidor-Colector (marcada con un círculo) y adquiere forma de serpentín que se ajustará a la zona marcada en la Figura 49 correspondiente a la ubicación de la primera unidad IFF enfriándola por contacto entre el serpentín y la pared que la delimita. Posteriormente pasa a través de la unidad BFU para acabar recorriendo la segunda unidad IFF para e introducirse de vuelta en el Distribuidor-Colector.

Como se explicó anteriormente, el objetivo de este estudio no es otro que garantizar que todos los Plank reciban la parte correspondiente de caudal de refrigerante que está dada por la potencia que cada uno disipa. Para conseguir esto será necesario diseñar la interfaz de cada uno de los grupos de boquillas de salida de fluido hacia los Plank teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- A mayor número de TRM en un Plank mayor será la potencia que este disipe y por tanto (y como se mostró en la especificación) mayor será el caudal que este necesite para ser enfriado.
- A mayor caudal y para una idéntica sección, mayor será la caída de presión generada.
- A mayor número de TRM en un Plank, mayor será la longitud que el canal de refrigeración tenga para conseguir atravesarlo, por tanto mayor será también la caída de presión asociada.

Por lo que se da la paradoja de que el sistema tiende a evolucionar por si mismo de forma contraria a como es deseado que lo hiciera, es decir, a mayor número de TRM mayor caudal será necesario, sin embargo menor será la cantidad del mismo que reciba. Es por esto que será necesario regular el diámetro de las boquillas de forma que los Plank más largos tengan una boquilla mayor para favorecer la entrada de flujo, mientras que, a medida que los Plank se hacen más pequeños, menor debe ser el diámetro de la boquilla para que se produzca el efecto contrario.

Es por este motivo, que el objeto del análisis del Distribuidor-Colector es realizar un estudio del comportamiento del fluido y no, a diferencia del que se realizará para los Plank, del efecto del calentamiento a través del mismo que, por otra parte se considerará despreciable. Por esta razón, parece razonable pensar que no tiene sentido analizar el Distribuidor-Colector como tal, sino el volumen del líquido que encierra de forma que el estudio se simplifique considerablemente. Para ello, será necesario extraer dicho volumen mediante la realización de las siguientes operaciones en el programa de CAD:

- Generar un volumen sólido que envuelva al canal.
- Resta booleana de ambos sólidos.
- Adición de la geometría asociada a la unidad IFF.

Obtenemos el siguiente resultado (Figura 50) que representa la porción de volumen que encierra el canal de refrigerante del Distribuidor-Colector :

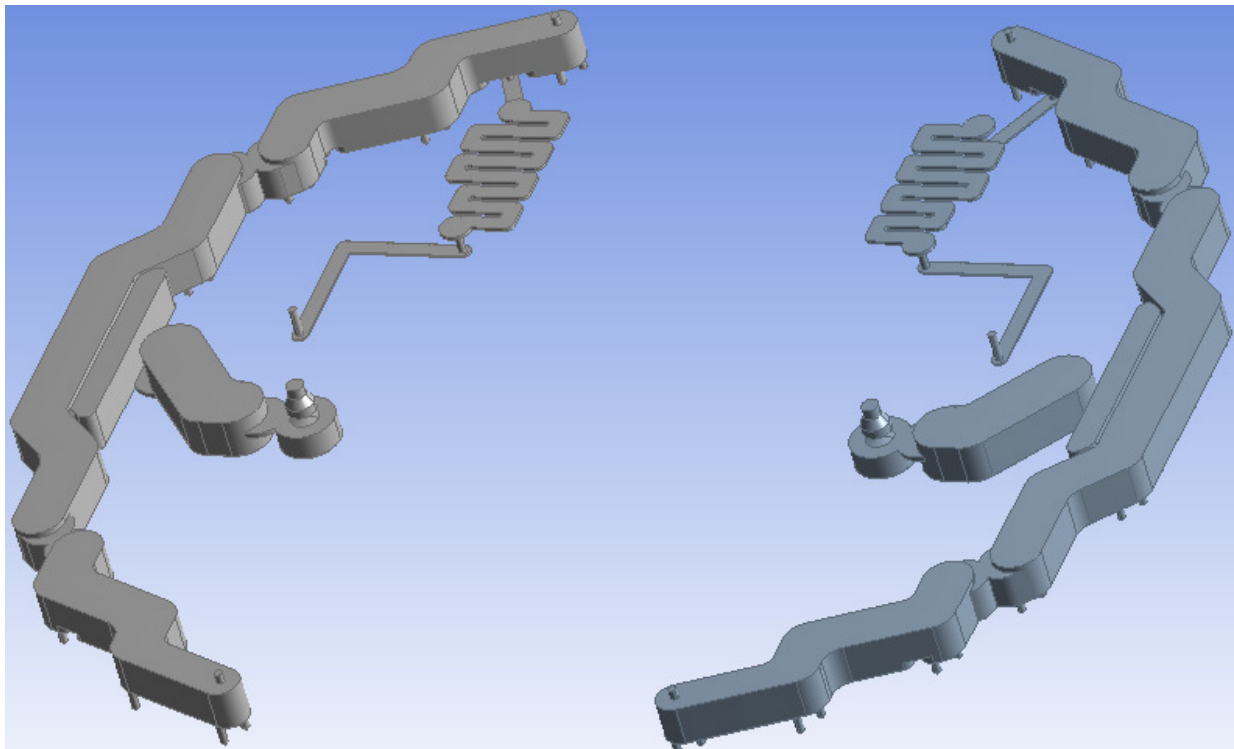


Fig. 50: Negativo del Distribuidor-Colector

Como era de esperar, se han obtenido dos figuras geométricas idénticas siendo una la imagen especula de la otra y, separadas por el hueco que ocupa la unidad BFU. Esta simetría será la que nos permita aprovechar para desechar una de las dos partes (el Colector) con el fin de que el modelo que se obtenga para el análisis mediante el software CFX[®] sea lo más liviano posible y tarde menos tiempo en correr. Por este motivo, la geometría final objeto de estudio será la mostrada en la Figura 51:

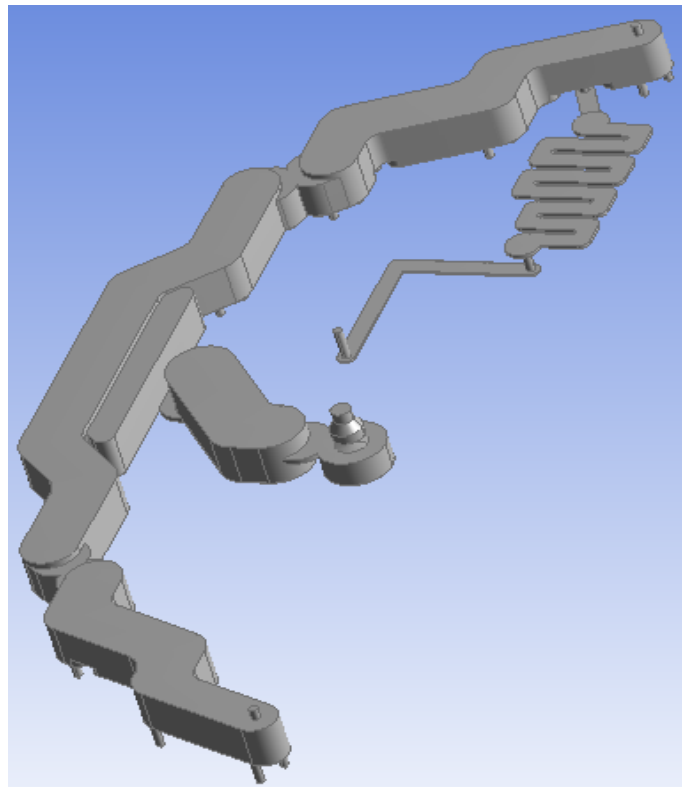


Fig. 51: Distribuidor



5. Soluciones propuestas y Resultados

5.1 Diseño preliminar

En este capítulo se propondrán diversas soluciones de diseño para conseguir alcanzar los objetivos de obligado cumplimiento establecidos en el apartado anterior.

En primer lugar será necesario hacer una primera valoración de las restricciones que están impuestas al diseño de forma que seamos capaces de evaluar cual será la condición crítica para obtener un punto de partida para el diseño que se aproxime lo más posible a la solución final, de forma que esta se alcance en el menor número de iteraciones posible.

La primera condición que se va a evaluar de forma analítica es la condición de máxima temperatura en la electrónica. Para ello nos vamos a fijar en la transmisión de calor al fluido.

Como se explicó en el apartado anterior, no se ha considerado en ningún análisis la transferencia de calor por radiación ni tampoco por convección, lo que significa que, una vez alcanzado el estado estacionario, toda la energía que entre debe ser igual a la energía que salga del sistema y, como toda la energía que sale del sistema lo hace a través del fluido, podemos plantear un balance de energía sobre el fluido de la siguiente manera:

$$\text{Energía(Entra)} = \text{Energía(Sale)} \quad (1)$$

$$E_{\text{Entra}} = E_{\text{Sale}} \quad (2)$$

$$Pot_{\text{Entra}} = Pot_{\text{Sale}} \quad (3)$$

$$Pot_{\text{Entra}} = Pot_{\text{Generada}} \quad (4)$$

$$Pot_{\text{Sale}} = C_p \cdot \dot{Q}_{\text{Másico}} (T_f - T_i) \quad (5)$$

$$Pot_{\text{Generada}} = C_p \cdot \dot{Q}_{\text{Másico}} (T_f - T_i) \quad (6)$$

Igualando las ecuaciones (4) y (5) obtenemos la ecuación (6) y despejando la temperatura de salida del fluido de esa misma ecuación tenemos:

$$T_f = \frac{Pot_{Generada}}{(C_p \cdot Q_{Másico})} + T_i \quad (7)$$

Evaluable la ecuación (7) en los 5 tipos de Plank tenemos las siguientes temperaturas de salida del fluido estimadas:

Tabla 5: Temperatura de salida teórica del fluido

Plank [Nº TRMs]	Cp [J/Kg.K]	Pot [W]	Qmásico [Kg/s]	Ti [°C]	Tf[°C]
16	3250	82,32	0,0025	40	50,13
24	3250	123,49	0,004	40	49,50
32	3250	164,65	0,005	40	50,13
36	3250	185,23	0,005	40	51,40
40	3250	205,82	0,006	40	50,55

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la temperatura de salida estimada del fluido será del orden de 50°C y, debido a la proximidad de la electrónica al flujo de refrigerante y de la elevada conductividad de los materiales empleados, podemos esperar unas temperaturas en la electrónica inferiores a los 100°C en su zona más caliente cumpliendo así el criterio de la máxima temperatura admisible en los módulos TRM. Por tanto, a priori, parece una mejor idea partir de la premisa de que debemos conseguir cumplir el requisito de que todos los TRMs trabajen en una diferencia de temperatura igual o menor a 10°C.

Para cumplir con este último criterio habrá que elaborar la idea de que todos los TRM deben ser refrigerados en la misma cantidad y “al mismo tiempo” por lo que parece que un buen criterio para la distribución de los canales de refrigeración será un serpenteo horizontal en lugar de vertical ya que, de considerar este último, la cantidad de calor extraída por unidad de tiempo sería superior en los primeros TRM ya que ésta depende de la diferencia de temperaturas entre el fluido y el sólido en contacto siendo la temperatura del fluido menor a la entrada al circuito que a la salida. Esta idea se desprende que el intercambio de calor por convección se rige por la ecuación:

$$Pot \left[\frac{J}{s} \right] = H \left[\frac{W}{(m^2 \cdot K)} \right] \cdot A [m^2] (T_s - T_f) [K] \quad (8)$$

Donde “H” es el coeficiente de convección que depende de las condiciones del flujo y de la geometría por la que éste circula. Obviamente, estas “H” las calcula automáticamente Flotherm® por tratarse de un programa de análisis fluido-térmico.

Una vez asumida esta primera hipótesis de diseño, es necesario analizar el modo en que se va a realizar este serpenteo. Para ello, antes de nada conviene valorar el área asignada para la refrigeración del Plank.

En la imagen de la Figura 52 se muestra en color azul el área que se dedicará a la entrada y salida del fluido que, debido a las dimensiones de la misma no admitirá más que un simple canal de entrada y otro de salida respectivamente. Además de estas zonas, el fluido debe pasar por el área marcada en color rojo y, será esta la que admitirá distintas soluciones de diseño que habrá que valorar para lograr el diseño óptimo del sistema de refrigeración.

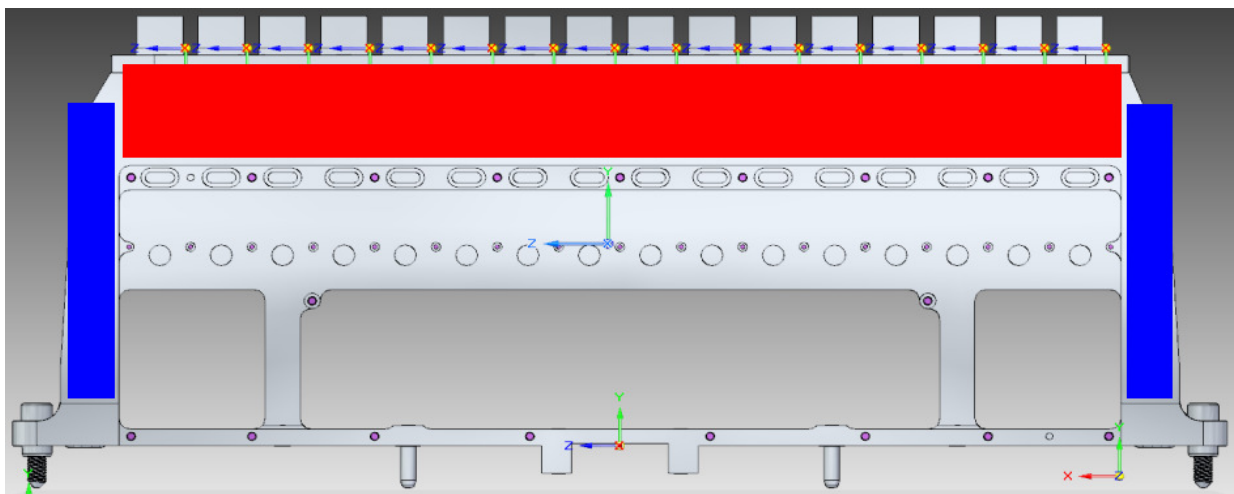


Fig. 52: Zonas de refrigeración

Una vez identificada la zona disponible para hacer pasar los conductos con el refrigerante y, llegada a la conclusión de que estos deben serpentear en horizontal, (es decir, que el fluido se introducirá al Plank por el conducto de la derecha según la imagen anterior, recorrerá toda la longitud marcada en color rojo y volverá) solo queda por determinar el número de canales que se van a emplear. Dicho de otra manera, falta por establecer el número de veces que el canal debe serpentear para lograr un diseño óptimo desde el punto de vista térmico, es decir, que la diferencia de temperatura entre el TRM más caliente y el más frío sea la menor posible siendo ésta como máximo de 10°C.

Para realizar esta tarea y al tratarse de un pequeño número de casos lógicos podemos calcular el espesor que tendrían los canales para cualquier número de ellos.

Inicialmente, podría parecer que existe un infinito número de posibles casos de diseño si tenemos en cuenta que además de jugar con el número de canales habría que dar un espesor a los mismos, dejando un espesor a la pared que los separe y, más aún si éstos no tienen el mismo espesor. Sin embargo, esta lista se reduce en gran medida si tenemos en cuenta las siguientes restricciones de diseño:

1. El espesor de los canales debe ser el máximo posible para cubrir la mayor superficie posible.
2. El espesor de la pared que separa los canales debe ser de al menos 2mm para que el proceso de pegado de la tapa se efectúe correctamente y no deje huecos que haga saltar al fluido de un canal a otro.
3. Cuanto mayor sea el número de canales mayor será el coste de fabricación de los Plank por partida doble ya que:
 - ⤴ Mayor será la longitud a mecanizar y por tanto el tiempo.
 - ⤴ Menor será el diámetro de la fresa y por tanto aumentarán los costes asociados a la herramienta.
4. El espesor de todos los canales debe ser idéntico para que puedan ser mecanizados con la misma fresa y así disminuir el coste asociado a:
 - ⤴ El uso de más de una herramienta.
 - ⤴ El cambio de herramienta.
5. La altura máxima disponible para el mecanizado de los canales es de 24.85mm (debido a que el hueco restante es ocupado por la tarjeta controladora de los TRM).
6. Los límites superior e inferior del área delimitada para la refrigeración hacen las veces de pared superior del primer canal y pared inferior del último canal.

A la vista de los anteriores criterios básicos, además podemos establecer:

- Según los criterios (1) y (5), el área que se empleará serán los 24,85mm de altura y toda la profundidad disponible.
- Según los criterios (1) y (2), los canales serán lo más anchos posibles en detrimento del espesor de la pared que los separa, por lo tanto, el espesor de ésta será de 2mm en cualquier caso.
- El número de canales tiene que ser impar puesto que el fluido entra por un lateral al Plank y sale por el contrario.

Una vez definidos los criterios anteriores, podemos encontrar la fórmula que nos permitirá calcular el espesor de los canales en función de su número:

$$\text{Número de paredes} = N_{\text{Paredes}}$$

$$\text{Número de canales} = N_{\text{Canales}}$$

$$\text{Espesor del canal} = E_{\text{Canal}}$$

$$\text{Espesor de la pared} = E_{\text{Pared}}$$

$$N_{\text{Paredes}} = N_{\text{Canales}} - 1 \quad (9)$$

$$H_{\text{Máx}} = N_{\text{Paredes}} \cdot E_{\text{Pared}} + N_{\text{Canales}} \cdot E_{\text{Canal}} \quad (10)$$

$$H_{\text{Máx}} = (N_{\text{Canales}} - 1)E_{\text{Pared}} + N_{\text{Canales}} \cdot E_{\text{Canal}} \quad (11)$$

Podemos despejar:

$$E_{\text{Canal}} = \frac{(H_{\text{Máx}} - (N_{\text{Canales}} - 1)E_{\text{Pared}})}{N_{\text{Canales}}} \quad (12)$$

Y Sabiendo que:

$$H_{\text{máx}} = 24.85 \text{ mm}$$

$$E_{\text{Pared}} = 2 \text{ mm}$$

Podemos finalmente expresar el espesor del canal en función del número de canales:

$$E_{\text{Canal}} = \frac{(24.85 - (N_{\text{Canal}} - 1)2)}{N_{\text{Canal}}} \quad (13)$$

Que nos permitirá generar la siguiente tabla con la información que necesitamos para obtener un punto de partida razonable para el diseño de los canales:

Tabla 6: Espesor de los canales

Ncanales	Ecanal [mm]
1	24,85
3	6,95
5	3,37
7	1,84
9	0,98

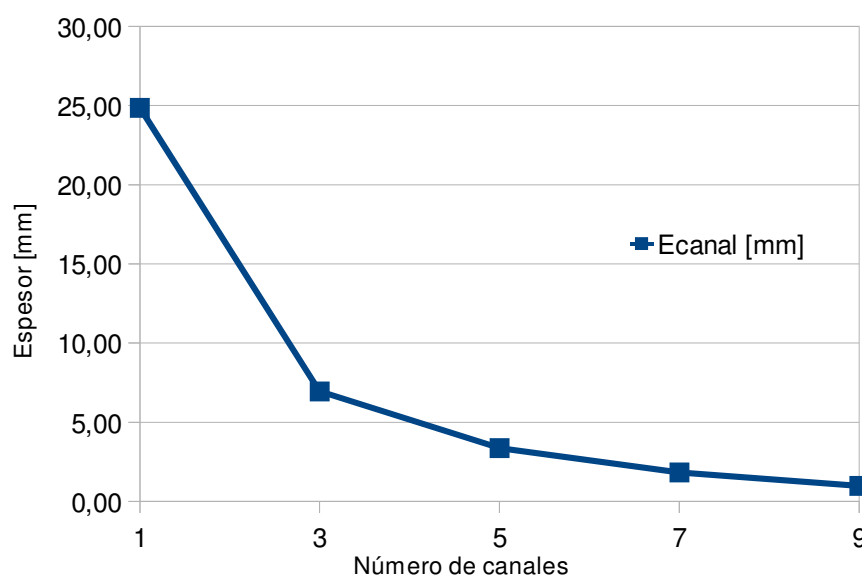


Fig. 53: Evolución del espesor del canal en función del número de canales

A la vista de los resultados anteriores podemos concluir que el espesor del canal decrece rápidamente a medida que aumentamos su número siendo demasiado pequeño en el caso de 7 canales en adelante y careciendo de sentido en el caso trivial de un solo canal, ya que la velocidad de paso del fluido sería tan pequeña que provocaría un sobre-enfriamiento de los primeros TRM a costa del sobrecalentamiento de los últimos, lo cual haría que la condición establecida en la especificación no se cumpla con total seguridad.

En cuanto a los valores intermedios (3 y 5 canales), ambos proporcionan un espesor de canal razonable por lo que se han generado sendos modelos para chequear cual de los dos diseños de partida entrega mejores resultados y poder realizar iteraciones en caso de ser necesarias.

5.2 Tres Canales

El modelado de los Plank y de los TRM consistió fundamentalmente en reproducir lo más fielmente posible la geometría de los mismos mediante las herramientas geométricas de las que dispone Flotherm[®]. Sin embargo el caso de los canales fue totalmente distinto ya que la zona marcada en rojo en la Figura 54 se recepcionó completamente hueca para efectuar el diseño completo de la misma. Como se pudo observar en el apartado anterior, se decidió que una buena solución de partida sería la opción de 3 canales situados en paralelo según la dirección longitudinal del Plank. A lo largo del capítulo 6 se explicarán las distintas fases de rediseño así como los diferentes resultados que se ha ido obteniendo para todos los casos que ha sido necesario estudiar con el fin de dar una solución válida para los 44 Plank que componen la antena.

A modo de nota informativa para explicar las siguientes ilustraciones referentes al diseño de los canales cabe destacar que, como se explicó anteriormente, los Plank son estructuras cuyo objetivo proporcionar asiento a los módulos TRM y que para el óptimo aprovechamiento de la superficie disponible existían Plank de 16, 24, 32, 36 y 40 TRM. Esto hace que en la geometría de los Plank (sobre todo en los que portan un mayor número de TRM) una de sus dimensiones prevalezca frente a las otras dos, por lo que, de querer mostrar el módulo completo, las otras dos dimensiones se mostrarían tan pequeñas que difícilmente podríamos apreciar en detalle la geometría. Es por esto que en las siguientes ilustraciones solo se muestra la parte inicial y final de los diseños por ser las zonas de mayor interés, obviando los tramos rectos intermedios.

El diseño de los 3 canales es el mostrado en la siguiente imagen:

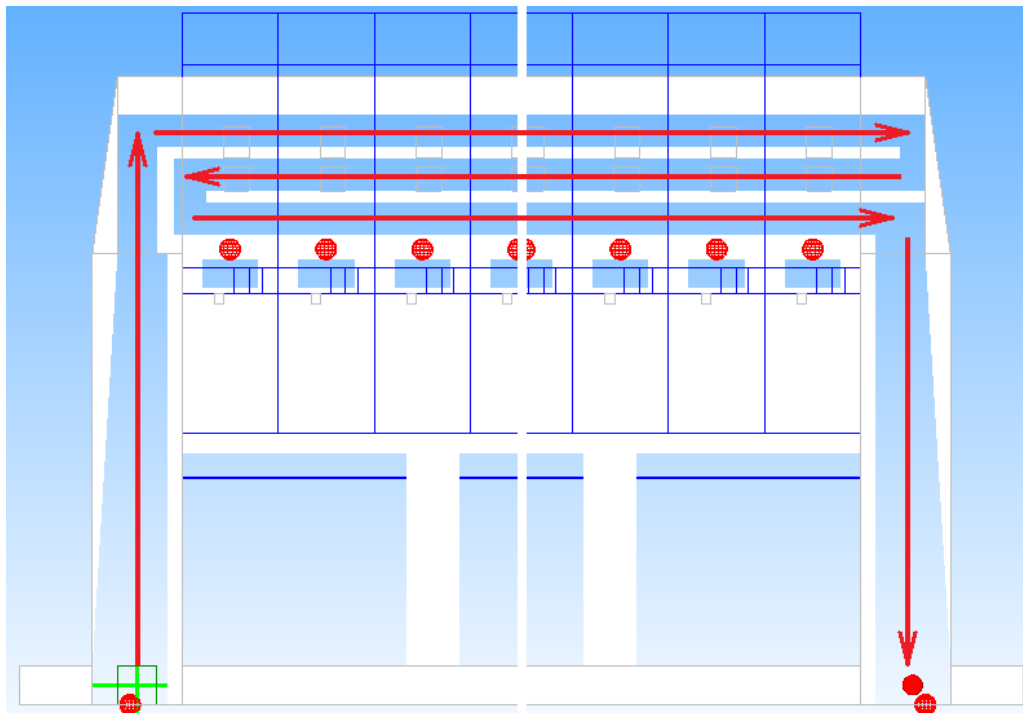


Fig. 54: Diseño de 3 Canales con la ruta del fluido marcada en rojo

Como se puede observar en la imagen anterior, la pared queda reducida a los 2mm que se impusieron en la condición de diseño para intentar cubrir la mayor área posible con fluido por lo que el espesor de los canales será de 6.95mm cada uno. Los resultados de temperatura que se han obtenido para este caso de carga y esta configuración de canal en cada uno de los TRM que componen los cinco modelos diferentes de Plank son los representados en las siguientes gráficas:

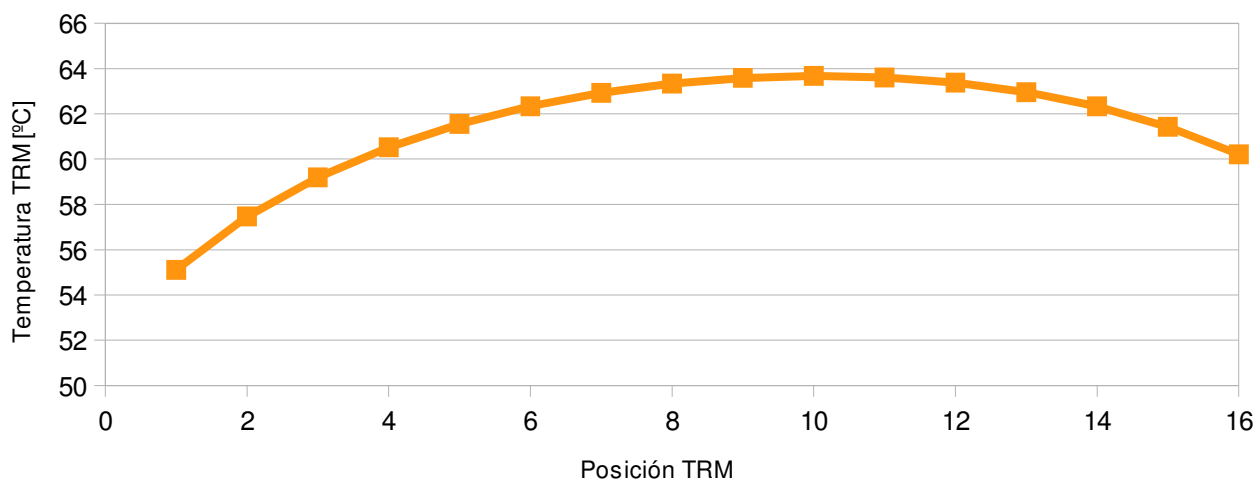


Fig. 55: 3 Canales, Plank con 16 TRM

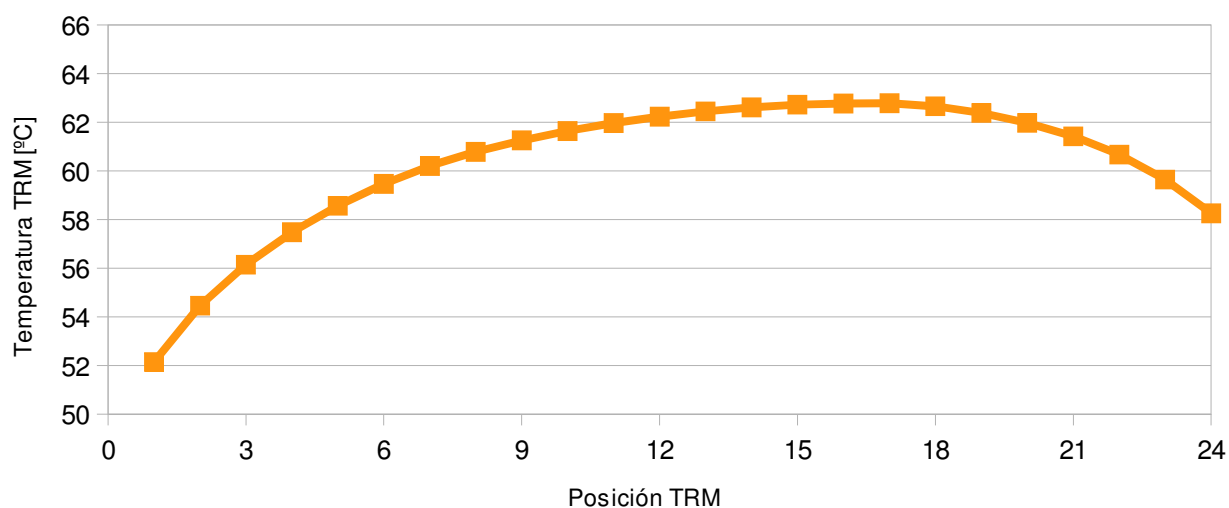


Fig. 56: 3 Canales, Plank con 24 TRM

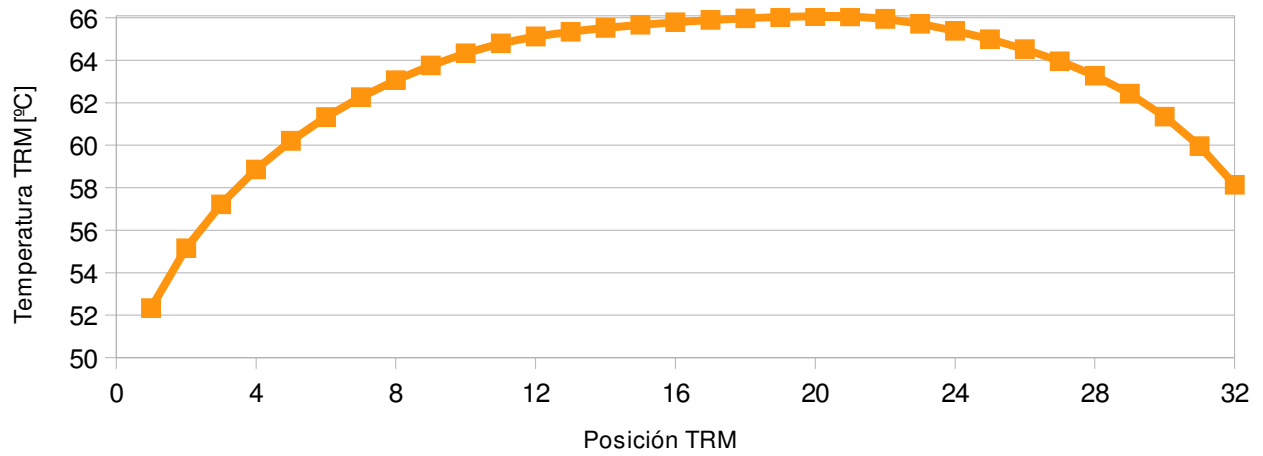


Fig. 57: 3 Canales, Plank con 32 TRM

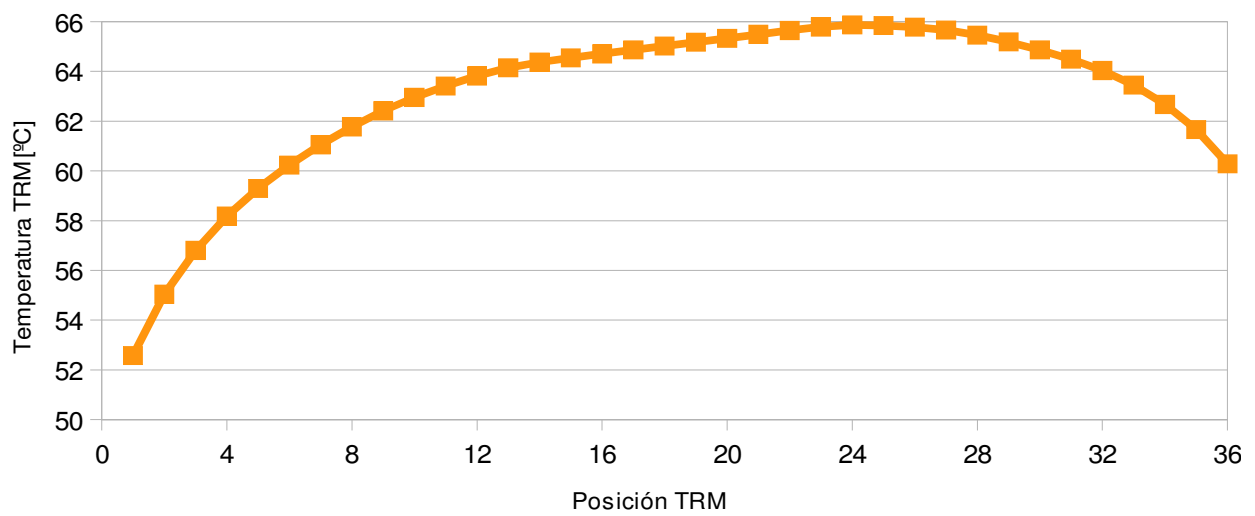


Fig. 58: 3 Canales, Plank con 36 TRM

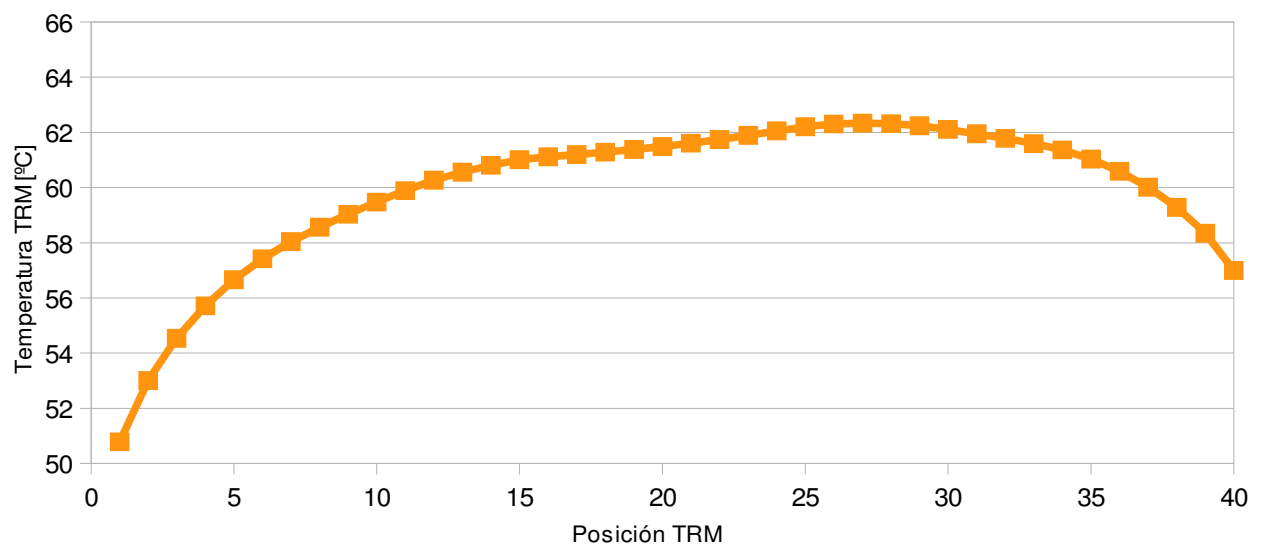


Fig. 59: 3 Canales, Plank con 40 TRM

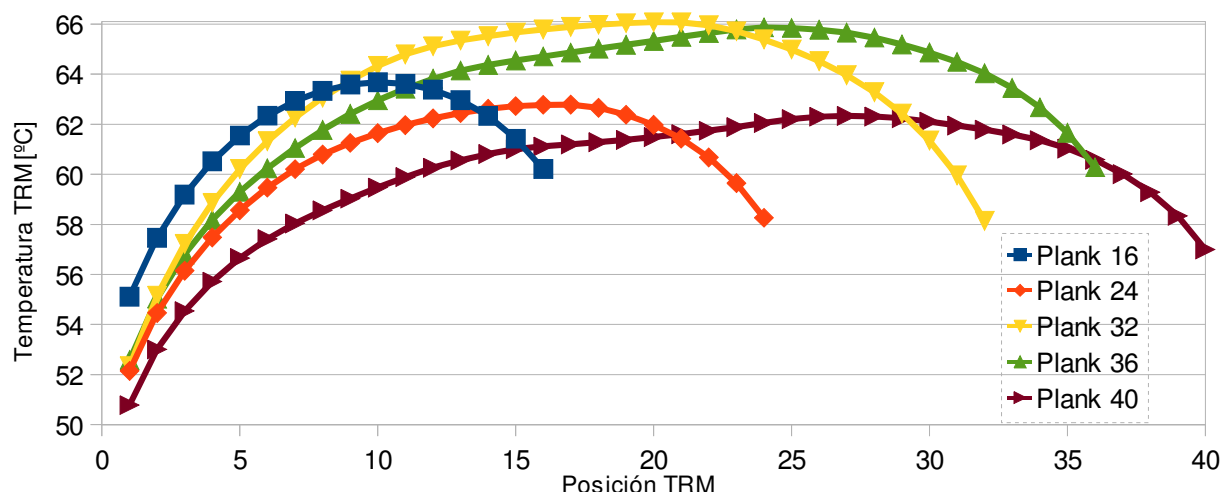


Fig. 60: 3 Canales, todos los Plank

Estos gráficos muestran la temperatura de los módulos TRM en función de la posición relativa que ocupan en el Plank. Todas estas gráficas han sido generadas cuidando que el máximo y mínimo del eje de ordenadas coincidan para que el lector pueda tener mayor visibilidad sobre la temperatura absoluta y relativa de los TRM. A partir de dichos resultados podemos extraer la siguiente información:

Observando la Figura inmediatamente anterior, encontramos que la máxima temperatura que podemos encontrar en los componentes de los TRM refrigerados mediante esta configuración corresponde al caso de el Plank que porta 32 TRM. Además, como se puede observar en las dos siguientes imágenes que muestran en detalle el campo de temperaturas sobre el Plank y los TRM, dicha temperatura es de 78.4°C que se encuentra por debajo de la que se mostró en la especificación por lo que la hipótesis que se formuló en la que suponíamos que la máxima temperatura obtenida en cualquier TRM es inferior a los 100°C es cierta siendo acertado el criterio por el que se ha optado comenzar el diseño.

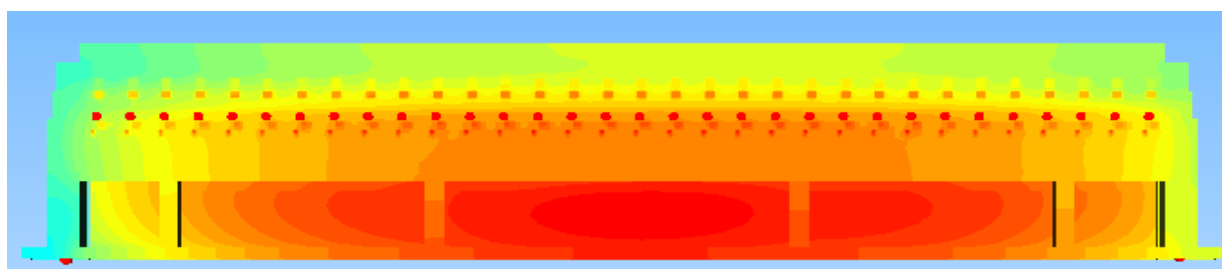


Fig. 61: Campo de temperaturas. 3 Canales, Plank 32

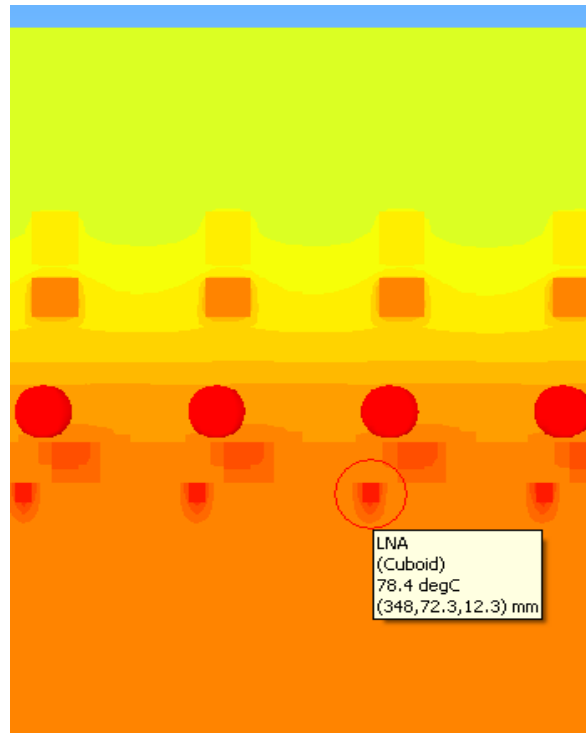


Fig. 62: Detalle de la zona caliente mostrada en la imagen 706

Además, con los datos proporcionados por la Figura 60 podemos construir la siguiente tabla de resultados:

Tabla 7: Salto térmico en los TRM para el diseño de 3 canales

3 CANALES	T _{máx} [°C]	T _{min} [°C]	ΔT [°C]
Plank 16	63,68	55,11	8,56
Plank 24	62,79	52,15	10,64
Plank 32	66,07	52,34	13,73
Plank 36	65,87	52,58	13,29
Plank 40	62,33	50,79	11,55

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la condición de que la diferencia de temperatura entre el TRM más caliente y el más frío tenga que ser menor que 10°C no se cumple para los modelos de Plank que portan más de 16 TRM. Para este último caso sí que lo cumplen por lo que podemos dar por buena esta solución con la restricción de que solamente puede ser empleada para el más pequeño de los módulos portadores.

Una vez resuelto el modelo de 3 canales para las 5 configuraciones posibles de Plank, pasamos a resolver las mismas solo que con el modelo basado en cinco canales (tres de ida y dos de vuelta) para realizar una comparación entre ambos y extraer las primeras conclusiones de optimización del diseño.

5.3 Cinco Canales

Basándonos en el diseño anterior, el diseño de cinco canales es el siguiente:

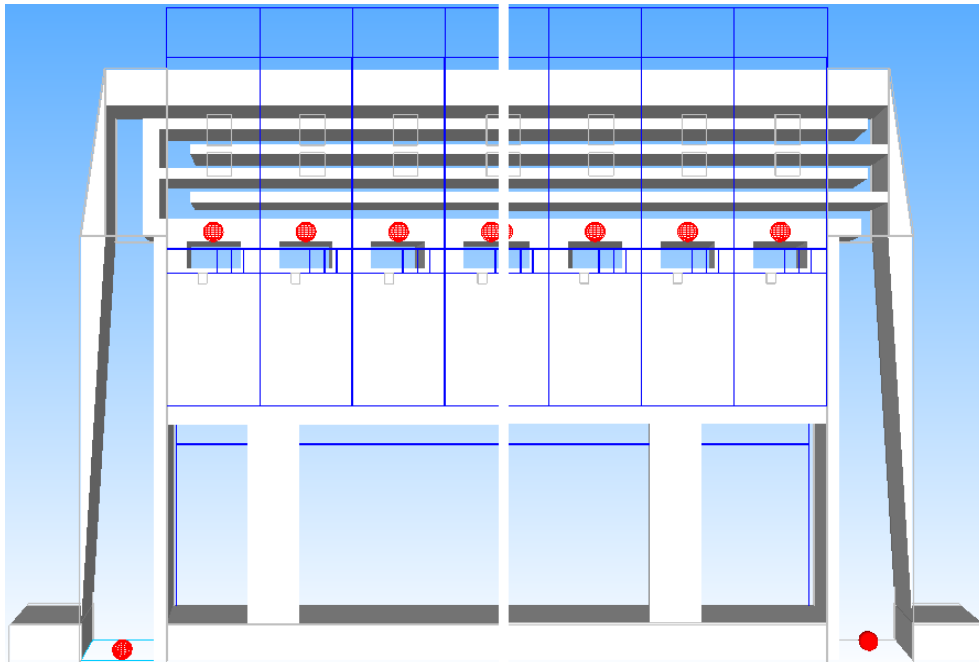


Fig. 63: Diseño de Plank con 5 Canales

Como se puede observar en la imagen anterior, el recorrido que sigue el fluido es el correspondiente a tres canales de ida y dos de vuelta. Los resultados de temperatura en los TRM que se han obtenido para esta disposición geométrica son los siguientes:

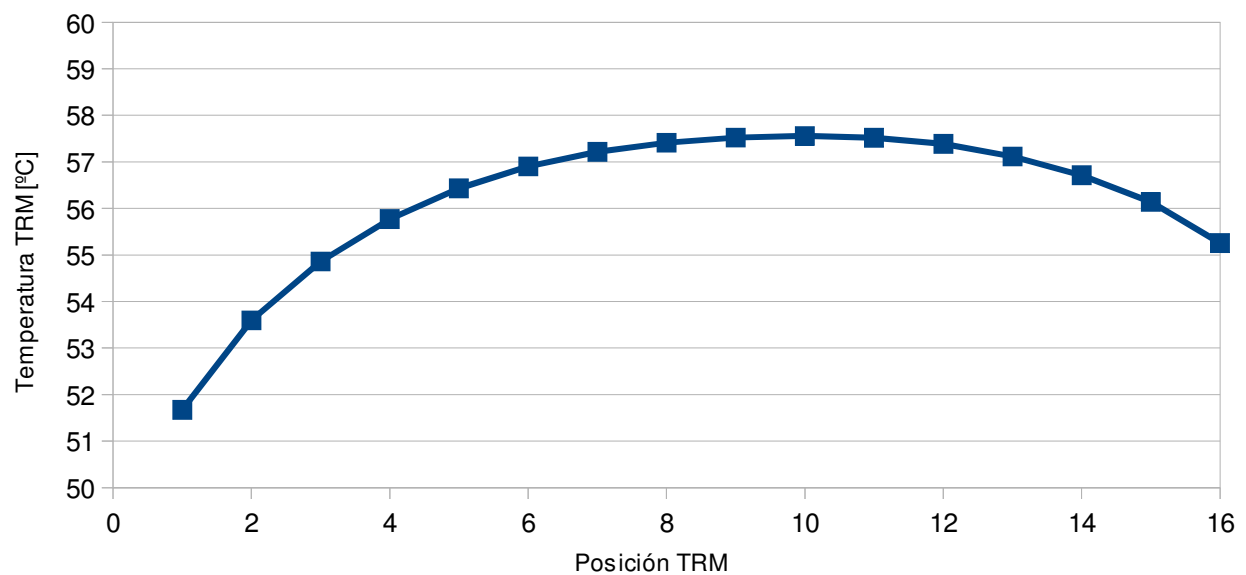


Fig. 64: 5 Canales, Plank con 16 TRM

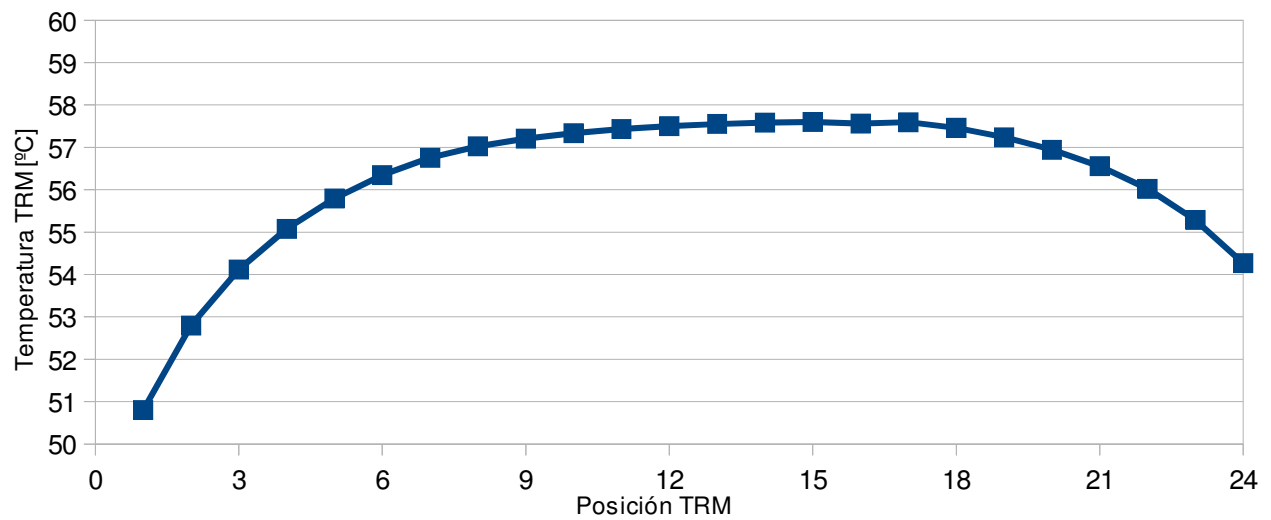


Fig. 65: 5 Canales, Plank con 24 TRM

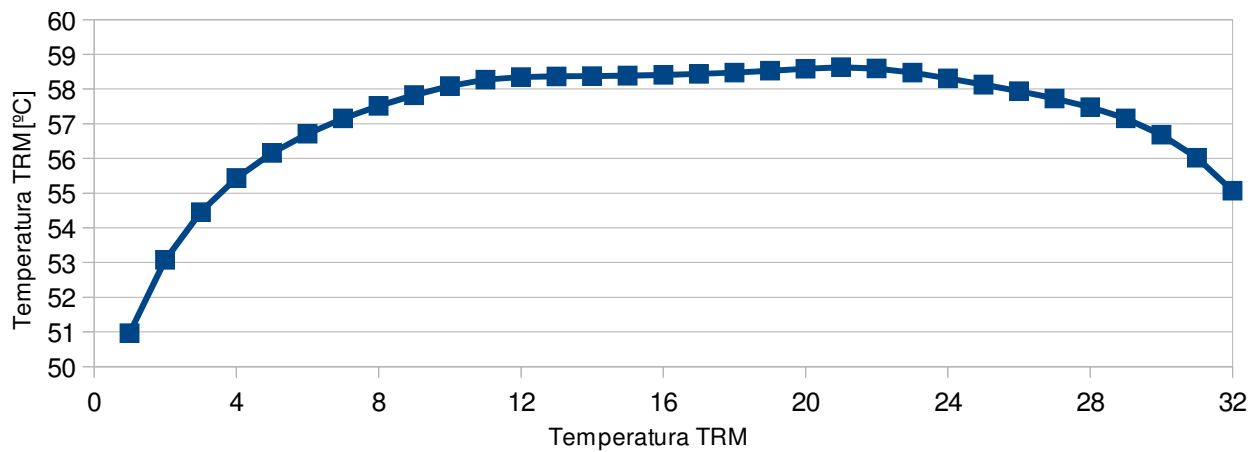


Fig. 66: 5 Canales, Plank con 32 TRM

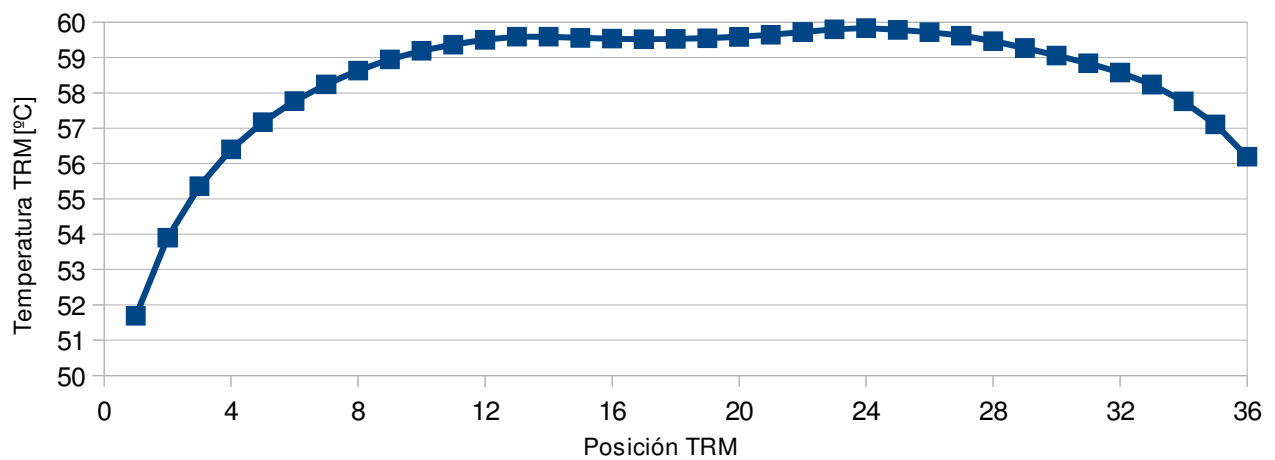


Fig. 67: 5 Canales, Plank con 36 TRM

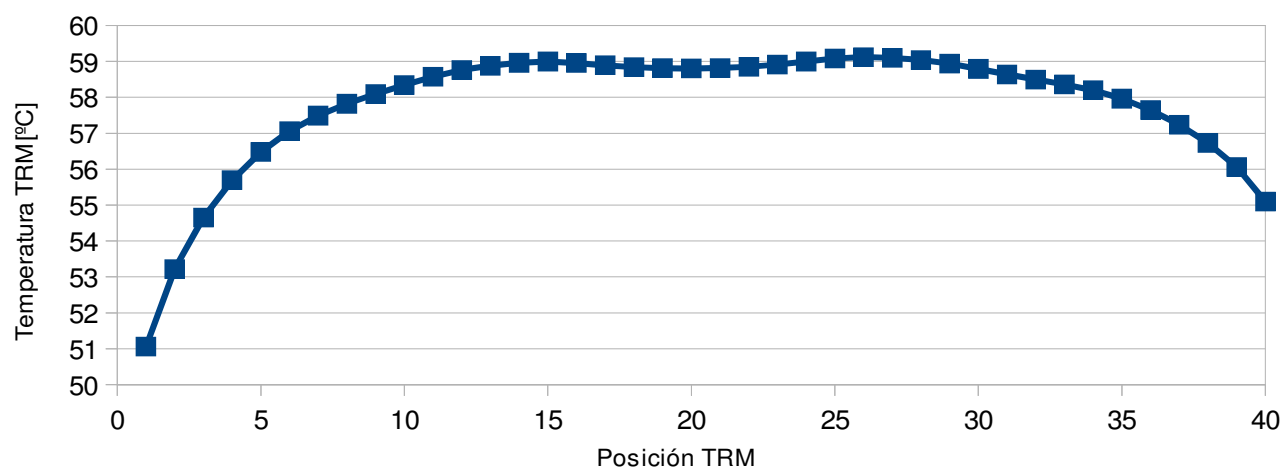


Fig. 68: 5 Canales, Plank con 40 TRM

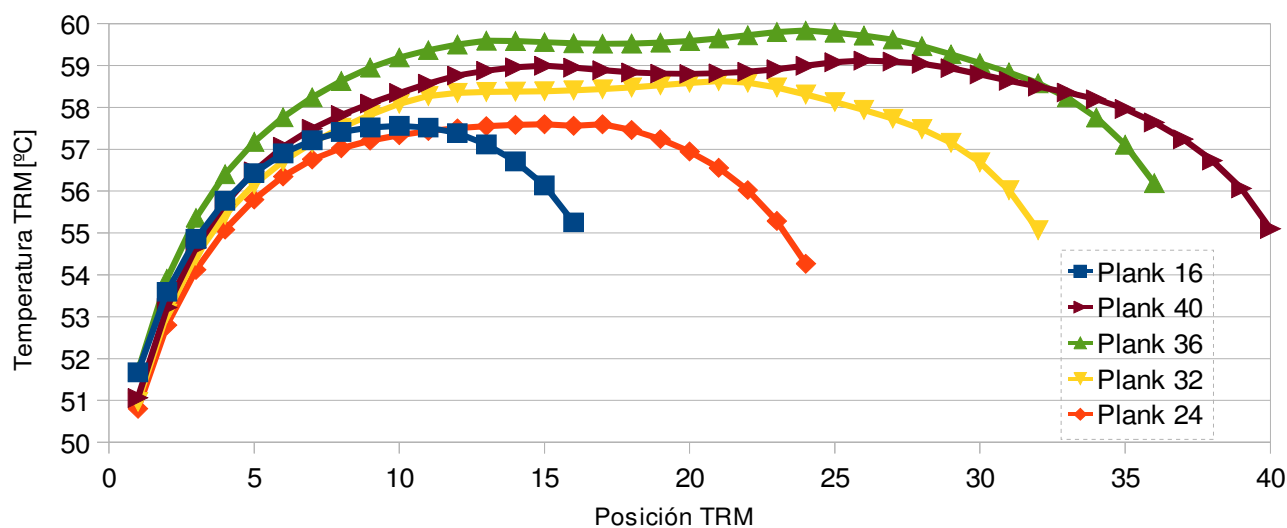


Fig. 69: 5 Canales, todos los Plank

A la vista de los resultados obtenidos en la gráfica anterior para este caso de diseño, podemos construir la siguiente tabla que represente la diferencia de temperatura entre el TRM más caliente y el más frío:

Tabla 8: Salto térmico en los TRM para el diseño de 5 canales

5 CANALES	Tmáx [°C]	Tmin [°C]	ΔT [°C]
Plank 16	57,56	51,67	5,88
Plank 24	57,60	50,80	6,80
Plank 32	58,63	50,96	7,67
Plank 36	59,83	51,69	8,15
Plank 40	59,12	51,06	8,06

Según los resultados obtenidos en el modelo anterior, podemos concretar que la solución de dividir el área en 5 canales es válida para todos los modelos de Plank, independientemente del número de TRMs que porten y por tanto de su longitud, por lo que ya disponemos de una solución válida que, desde el punto de vista térmico cumple con la especificación.

Además de la validez o no de las dos soluciones anteriormente propuestas, de las tablas y gráficos anteriores podemos extraer información que nos permita hacer un rediseño de las mismas y así intentar alcanzar una solución que aporte mejores resultados.

Como se puede observar, las Figuras 60 y 69 muestran un mismo patrón de comportamiento que no depende del número de canales empleados ni del número de TRM que portan los Plank. Según este patrón, podemos identificar las siguientes tres zonas diferenciadas en cuanto a la temperatura de los TRM se refiere:

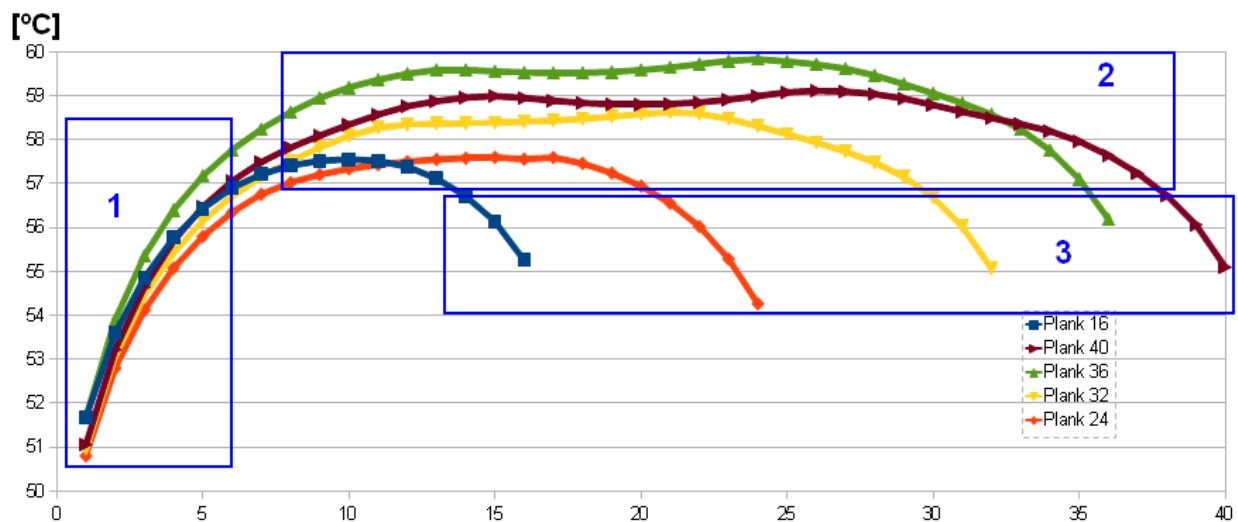


Fig. 70: Distribución de la temperatura en 5 canales, zonas destacadas

- ⤴ Región 1: Como se puede observar en la imagen anterior, todos los Plank, independientemente de su tamaño, tienen una primera zona común en la que la temperatura de los TRM crece de forma lineal desde el primer TRM (que en todos los casos de estudio posee la menor de las temperaturas) hasta aproximadamente el quinto o sexto módulo. En estos módulos, podemos encontrar una variación de temperatura del orden de 7°C
- ⤴ Región 2: Se trata de un tramo, igualmente común en todos los módulos (aunque se puede apreciar mejor cuanto mayor es la longitud del Plank) en el que la temperatura de los módulos que ocupan las posiciones centrales se mantiene prácticamente constante.
- ⤴ Región 3: Se puede apreciar el mismo fenómeno que en la región 1, solo que con pendiente negativa, es decir, a medida que nos acercamos a los últimos módulos del Plank, la temperatura decrece linealmente. En este caso y a diferencia de lo que ocurre en la primera región, la variación de temperatura afecta a los últimos 4 ó 5 módulos.

La presencia de estas tres regiones es la que propicia la diferencia de temperaturas próxima (o en ocasiones superior) a los 10°C. Dicho de otra manera, esta diferencia de temperatura disminuiría si consiguiésemos que las regiones 1 y 2 se aproximen en altura ya que son las que propician esta variación por contener a los módulos más frío y más caliente respectivamente.

Para tratar de subsanar esta variación, a continuación se tratará de dar explicación a la existencia de estas tres regiones para intentar así atacar al problema. Para ello se va a recurrir al siguiente esquema que trata de representar el efecto del enfriamiento de los TRM mediante los diferentes canales. Puesto que el problema es idéntico en el caso de 3 y 5 canales, se elige el primero de ellos por simplicidad en el desarrollo de la explicación:

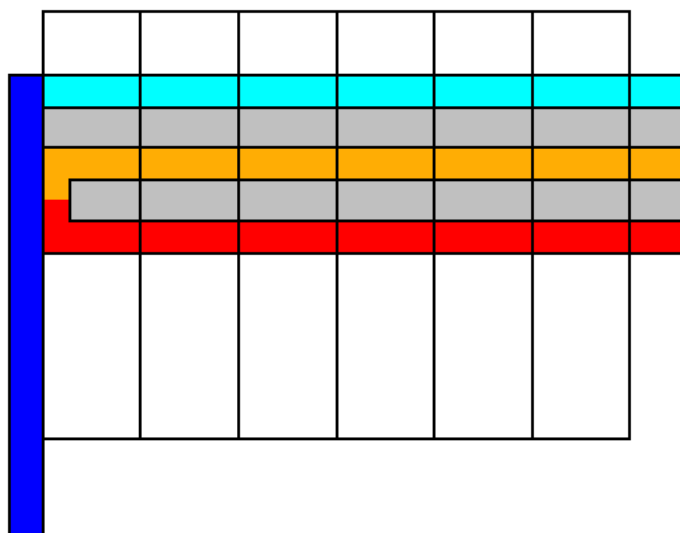


Fig. 71: Esquema de temperatura de los canales

Como se puede observar, la figura anterior divide el área ocupada por los canales en 5 zonas diferenciadas por el siguiente código de colores:

- ⤴ En color **azul oscuro** se representa la porción de fluido correspondiente a la región de entrada al sistema. Por este motivo, será la zona que se encuentre a menor temperatura y a la que, para esta explicación llamaremos “canal muy frío”.
- ⤴ En color **azul claro** se representa la porción de fluido correspondiente al primer canal, que a partir de ahora llamaremos “canal frío”.
- ⤴ En color **naranja** se representa la porción de fluido correspondiente al segundo conducto, que a partir de ahora llamaremos “canal templado”.
- ⤴ En color **rojo** se representa la porción de fluido correspondiente al último canal, que a partir de ahora llamaremos “canal caliente”.
- ⤴ Por último, en **gris** se representan las paredes que separan los canales.

Además, como se puede apreciar en el esquema anterior, se han representado 6 módulos TRM, en representación de todos los posibles que incorpore un Plank. Para esta explicación, los módulos TRM se van a dividir en dos grupos:

- ▲ Los ocupan una posición central (es decir, que no se encuentran en ninguno de los dos extremos). Todos estos módulos tienen en común que su refrigeración global es idéntica, es decir, que les corresponde la misma porción de fluido **frío**, **templado** y **caliente** lo que explica porque la temperatura de los mismos tiende a ser constante. En un principio podría pensarse que esto no es así, ya que parece obvio que un módulo que se encuentre situado cerca de la entrada resultará más refrigerado por el canal **frío** que uno que esté situado a la derecha del Plank puesto que el fluido frío, dentro de que se trata del canal con menor temperatura, a su vez se encontrará a menor temperatura al comienzo de su recorrido que al final del mismo puesto que aún no ha entrado en contacto con fuentes de calor, sin embargo, este efecto se verá compensado en el siguiente canal (**templado**) puesto que ocurrirá el mismo efecto pero en sentido contrario ya que enfriará en menor medida a los módulos situados en la izquierda que a los de la derecha.
- ▲ Los que ocupan uno de los dos extremos (solamente se muestra el correspondiente al extremo izquierdo que es el que provoca la mayor desviación de temperatura). En este caso, si contabilizamos las zonas de enfriamiento que le corresponden encontramos:
 - La zona que le corresponde de canal **frío**.
 - La zona que le corresponde de canal **templado**.
 - La zona que le corresponde de canal **caliente**.
 - La zona de paso del canal **templado** al canal **caliente**.
 - La zona de paso del canal de entrada que porta el líquido **muy frío** hasta la zona superior del Plank.

Tras esta enumeración, parece lógico pensar que sea el primero de los TRM el que se encuentre a una menor temperatura, puesto que recibe un mayor enfriamiento del que le corresponde, siendo especialmente agudizado por el efecto del último de los factores nombrados ya que le proporciona una gran zona de contacto (prácticamente toda la longitud del TRM) a la menor de las temperaturas posibles. Tanto es así, que este sobre-enfriamiento es el que provoca que por conducción, los TRM cercanos al primero consigan evacuar calor a través de éste, extendiéndose de esta forma el sobre-enfriamiento a los TRM contiguos y provocando la zona **1** que podíamos observar en la Figura 70.

Nota: Es importante recordar que la imagen anterior no representa la realidad de la geometría de los canales y paredes del sistema puesto que el objeto de la misma resulta en realizar una aclaración sobre el diseño. Además, conviene tener en cuenta que, pese que en todo momento mencionemos la existencia de un canal caliente, la temperatura en el mismo no superará en

Tras efectuar este análisis de los diseños preliminares (nótese que este estudio es extensible al modelo de 5 canales) podemos concluir que el problema que se presenta entre las regiones 1 y 2 no es tanto que la segunda región se encuentre a una temperatura superior a la que le corresponde, sino que la primera se encuentra claramente sobre-enfriada debido a su proximidad al canal de entrada.

The diagram shows a 7x7 grid with the following features:

- A solid blue vertical bar on the left side, spanning the entire height of the grid.
- A cyan horizontal bar at the top, spanning the entire width of the grid.
- A gray L-shaped region on the left side, spanning the first three rows and the first three columns.
- A yellow horizontal bar in the middle, spanning the entire width of the grid.
- A gray horizontal bar below the yellow one, spanning the entire width of the grid.
- A red horizontal bar at the bottom, spanning the entire width of the grid.

Este diseño se basa en el siguiente razonamiento: Si el problema que aparece es que los primeros TRM por proximidad al canal de entrada evacuan mucho mas calor que los que ocupan posiciones centrales y, puesto que nada se puede hacer para evitar esta situación, una posible solución sería hacer que el canal templado “gire” para convertirse en el canal caliente antes de llegar al final de su recorrido, de forma que se compense el exceso de calor que evacuan por dicha zona con el defecto de calor que conseguirán evacuar al negarles su porción correspondiente de los dos últimos conductos. Aplicando este razonamiento a nuestros modelos de tres y cinco canales obtenemos las iteraciones de diseño que se analizan a continuación.

5.4. Tres canales recortados

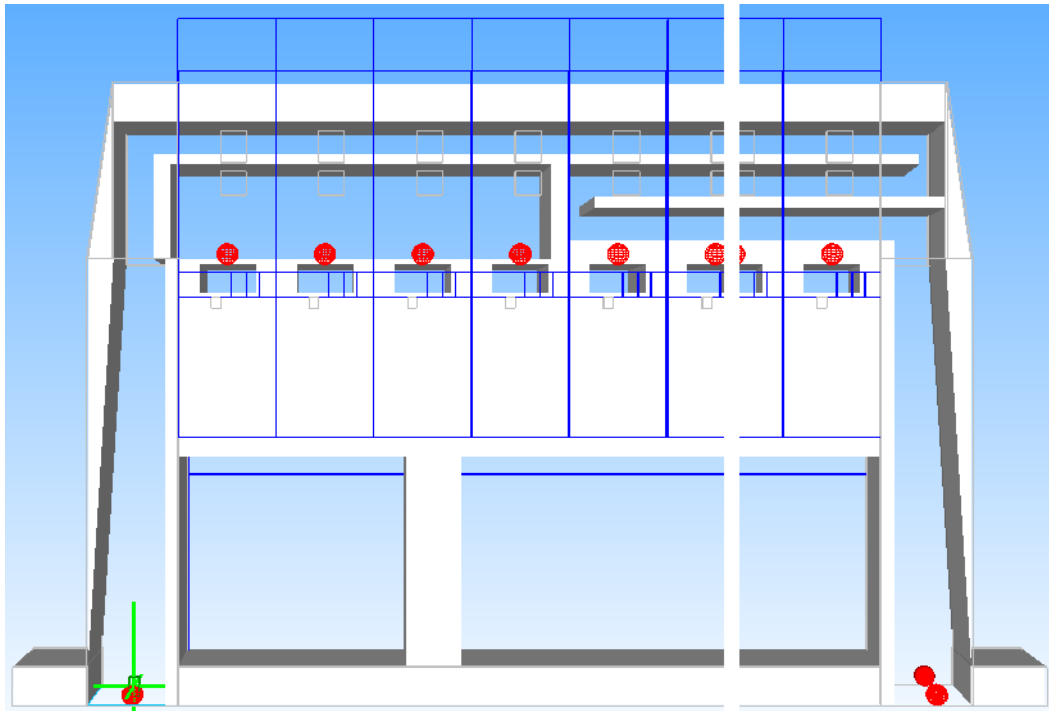


Fig. 73: Diseño con 3 canales recortados

Como se puede apreciar en la imagen superior, este diseño resulta similar al modelo de tres canales planteado inicialmente con la salvedad de que en esta ocasión, los canales 2 y 3 (correspondientes a los fluidos templado y caliente respectivamente) ven reducida su longitud para no prestar servicio a los primeros TRM puesto que ha quedado demostrado que éstos reciben contacto suficiente con el fluido debido a la región de entrada. Como ya se trató anteriormente, al tratarse de una aplicación aeronáutica, resulta imprescindible que el diseño de los Plank no aporte más masa de la estrictamente necesaria al conjunto del diseño por lo que se optará por mantener una cámara de aire en el lugar que anteriormente era ocupado por el fluido refrigerante y sus paredes de separación. Mediante el empleo de este sistema, se pretende conseguir un aumento localizado de la temperatura en los TRM próximos a la entrada con el fin de homogeneizar la temperatura en todos ellos. Los resultados que se han obtenido para los distintos modelos de Plank son los mostrados gráficamente en las siguientes figuras que representan la evolución de la temperatura de los TRM según la posición que ocupan dentro del Plank del mismo modo que se hizo con los diseños de tres y cinco canales completos:

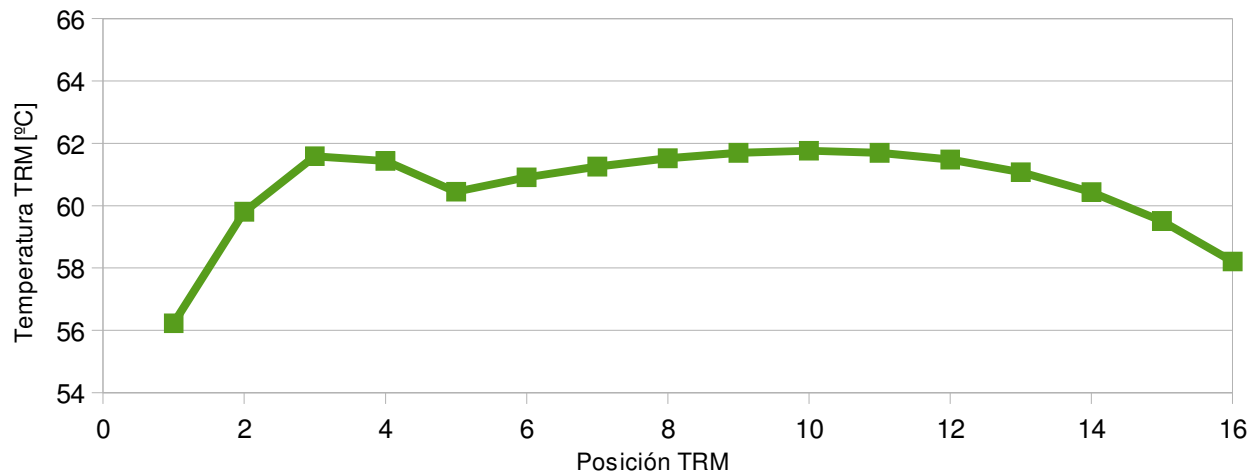


Fig. 74: 3 Canales recortados, Plank con 16 TRM

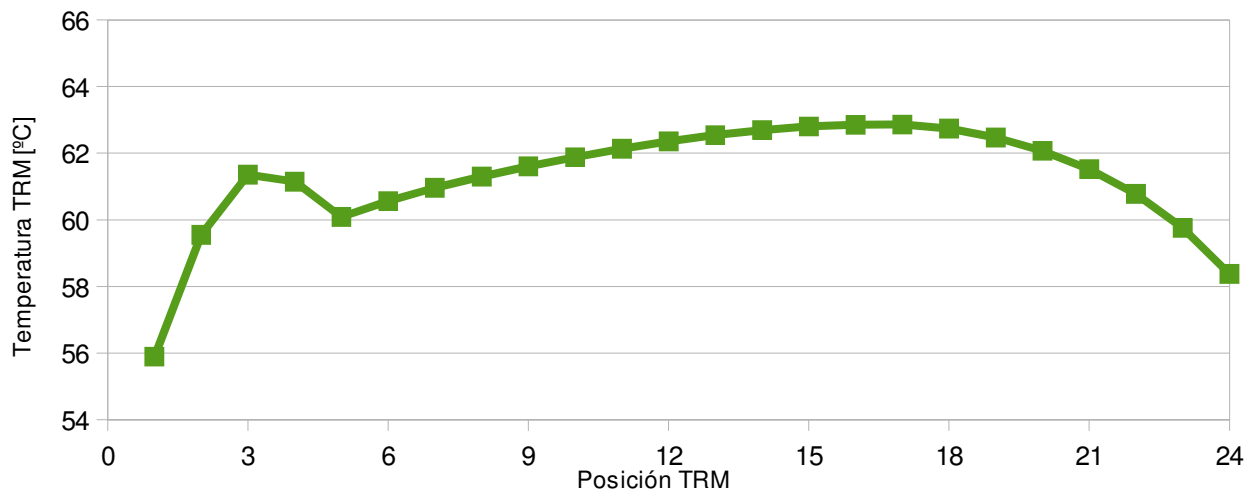


Fig. 75: 3 Canales recortados, Plank con 24 TRM

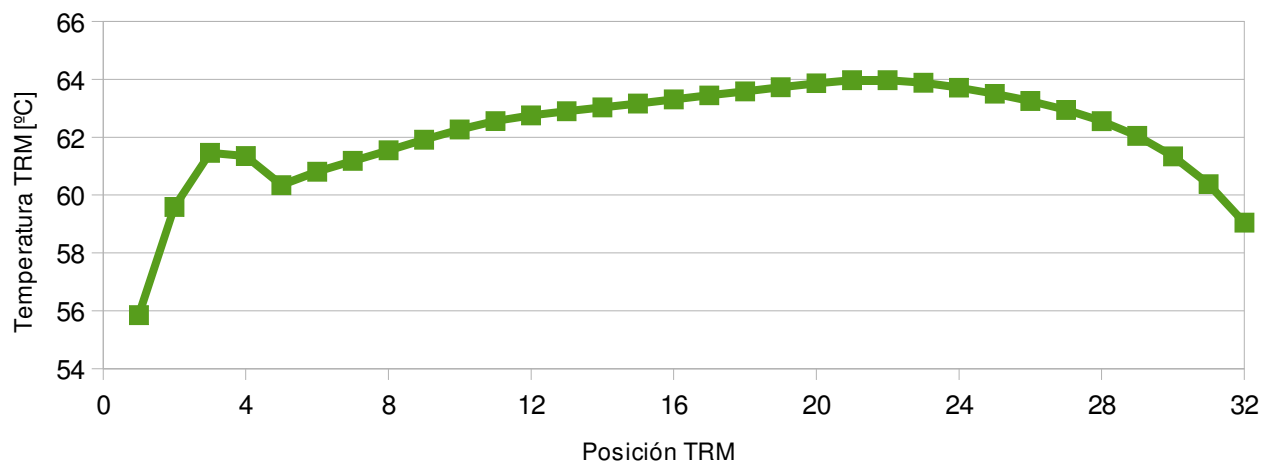


Fig. 76: 3 Canales recortados, Plank con 32 TRM

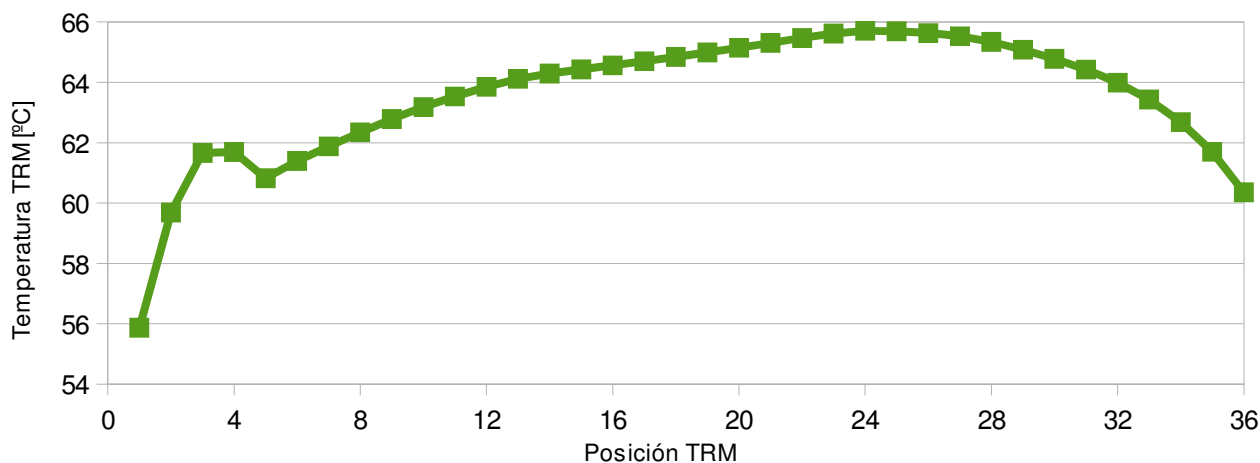


Fig. 77: 3 Canales recortados, Plank con 36 TRM

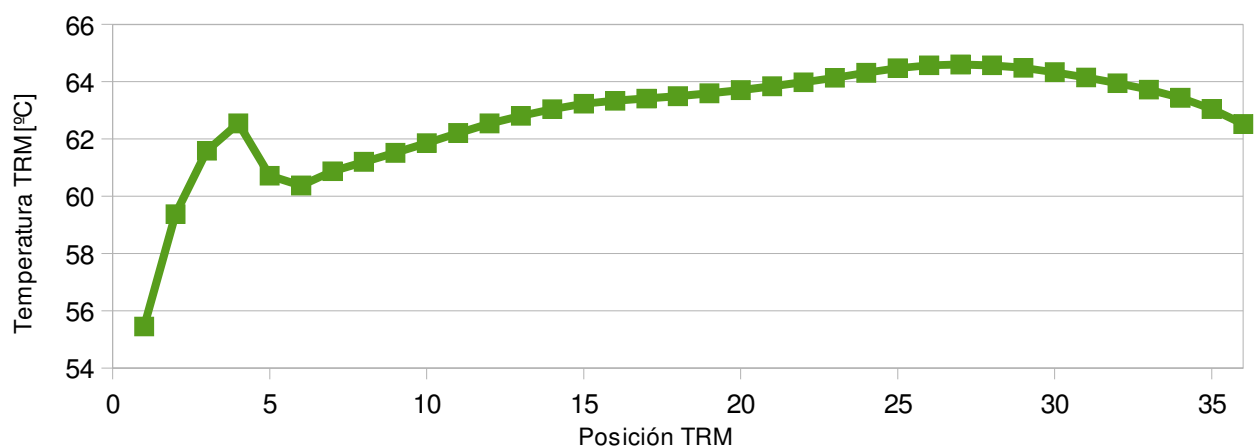


Fig. 78: 3 Canales recortados, Plank con 40 TRM

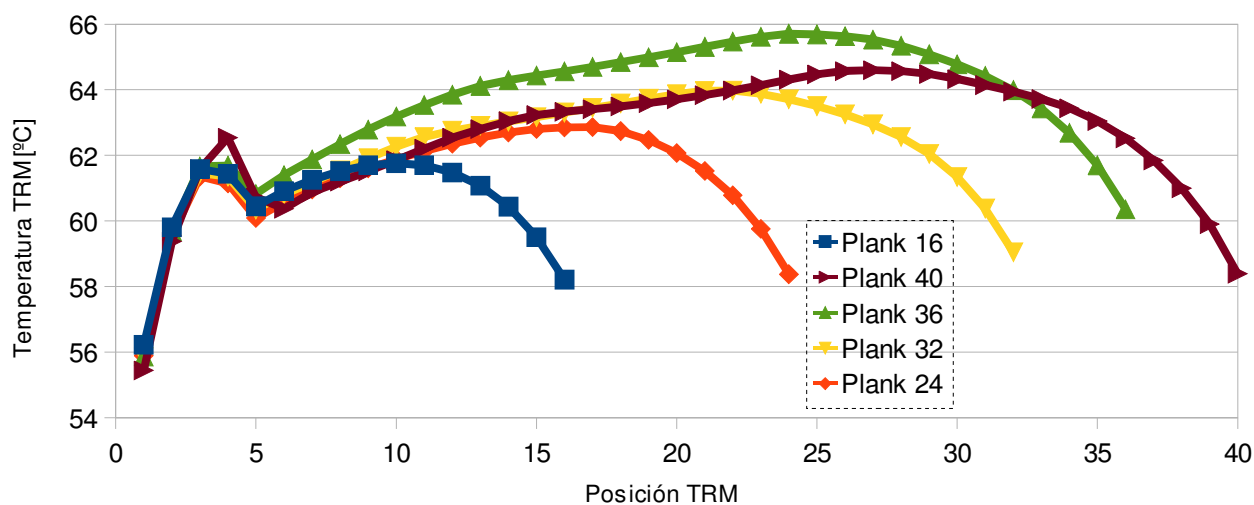


Fig. 79: 3 Canales recortados, todos los Plank

Al igual que se hizo con los diseños anteriores, a partir del gráfico representado en la Figura 79, podemos extraer la siguiente información:

Tabla 9: Salto térmico, diseño de 3 canales rec.

3 C-RECORT	Tmáx [°C]	Tmin [°C]	ΔT [°C]
Plank 16	61,70	56,23	5,47
Plank 24	62,86	55,89	6,97
Plank 32	63,97	55,85	8,12
Plank 36	65,69	55,87	9,82
Plank 40	64,60	56,23	9,15

Que al compararla con la extraída en el caso de tres canales simples por derivar esta iteración de éste último obtenemos la siguiente tabla en la que se pueden realizar las dos siguientes apreciaciones:

Tabla 10: Comparación casos 3 canales

	3 C. ΔT [°C]	3 C-R ΔT [°C]
Plank 16	8,56	5,47
Plank 24	10,64	6,97
Plank 32	13,73	8,12
Plank 36	13,29	9,82
Plank 40	11,55	9,15

- ⤴ Según los valores extraídos del modelo, se aprecia que éste es válido para todos los modelos de Plank, manteniéndose la anterior tendencia en la que a mayor longitud del mismo más difícil resulta cumplir con la especificación.
- ⤴ Todos los valores obtenidos mejoran la iteración inicial, tanto los que no cumplían anteriormente como el que sí lo hacía (16 TRM)

Del mismo modo que se hizo en el caso de los 3 y 5 canales simples, a continuación se explicará el gráfico de la Figura 80 según las diferentes regiones que en él aparecen:

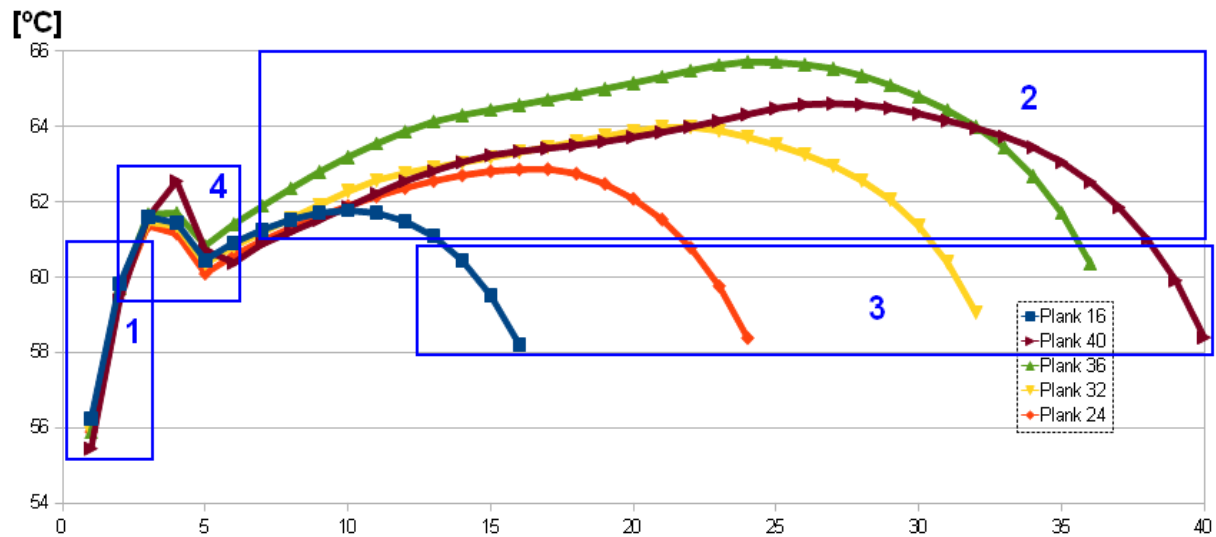


Fig. 80: Distribución de temperatura en 3 canales, zonas destacadas

- ⤴ **Región 1:** Es la misma región que podíamos observar en el gráfico de la Figura 70. Debido a la proximidad al canal de entrada, los módulos TRM que se encuentran situados próximos a ella sufren un sobre-enfriamiento. Las principales diferencias que distinguen a esta zona del gráfico 70 son:

 - Mayor pendiente de la recta.
 - Menor número de TRM afectados.
- ⤴ **Región 2:** Se trata de una zona similar a la presentada en la Figura 70. Los TRM centrales presentan la máxima temperatura por encontrarse alejados de las fuentes de entrada y salida de fluido.
- ⤴ **Región 3:** Se puede apreciar el mismo fenómeno que en la región 1, solo que con pendiente negativa, es decir, a medida que nos acercamos a los últimos módulos del Plank, la temperatura decrece linealmente. Igual que se pudo apreciar en la Figura 70, la variación de temperatura afecta a los últimos 4 ó 5 módulos.
- ⤴ **Región 4:** Se trata de una nueva zona con respecto al gráfico de la Figura 70. En ella se puede apreciar una prolongación de la zona lineal vista en la región 1 hasta alcanzar un máximo de temperatura local, para posteriormente llegar a un mínimo local que termina superponiéndose con lo que sería la gráfica anterior. La causa de aparición de esta nueva región es la modificación que se ha hecho en los canales templado y caliente. La explicación es la siguiente: Al ser menor la influencia del líquido refrigerante en esta zona, todos los TRM que en ella se encuentran se ven obligados a evacuar calor por su zona en contacto con el canal frío y por conducción de unos a otros hacia el canal de entrada. Esto conseguirá que el primer TRM mantenga una elevada capacidad de evacuación de calor que se irá perdiendo de forma lineal con los TRM sucesivos de forma que, de no encontrarse situado el meandro templado-caliente lo suficientemente cerca, podría provocar un calentamiento localizado que, para una distancia de límite

haría que por diferencia de temperatura nos salgamos de nuevo fuera del valor que indica la especificación y, de encontrarse en una distancia crítica, podría provocar la rotura del componente por alcanzarse su máximo valor de temperatura.

En un principio podría parecer que el efecto de la adición de la Región 4 aporta únicamente aspectos negativos como los explicados en el apartado anterior. Sin embargo, tal y como se puede apreciar en la Tabla 10, los valores de diferencia de temperatura han descendido en todos los casos debido a que los máximos se mantienen aproximadamente constantes mientras que el calentamiento provocado de la región de entrada hace que los mínimos pasen de estar cerca de los 50°C a casi los 56°C. De esta forma, podemos concretar que, desde el punto de vista térmico, esta iteración resulta válida y más ventajosa que la inicial, por lo que cabe esperar unos resultados aún mejores en el caso de 5 canales recortados puesto que ya de por sí, este mejoraba sustancialmente los resultados obtenidos con el modelo de 3 canales.

5.5 Cinco canales recortados

Tal y como se explicó en el apartado anterior, la motivación de este rediseño radica en intentar mejorar todos los resultados obtenidos hasta ahora puesto que, si el diseño de 5 canales mejoraba sustancialmente los resultados que aportaba el diseño con 3 canales y, al mismo tiempo, el diseño de 3 canales recortados mejoraba el diseño con 3 canales completos, cabe esperar que el diseño con 5 canales recortados mejore todo lo anterior. Como se puede apreciar en la siguiente imagen, este diseño consiste en una “combinación” de los anteriormente vistos en los apartados 5.2 y 5.3

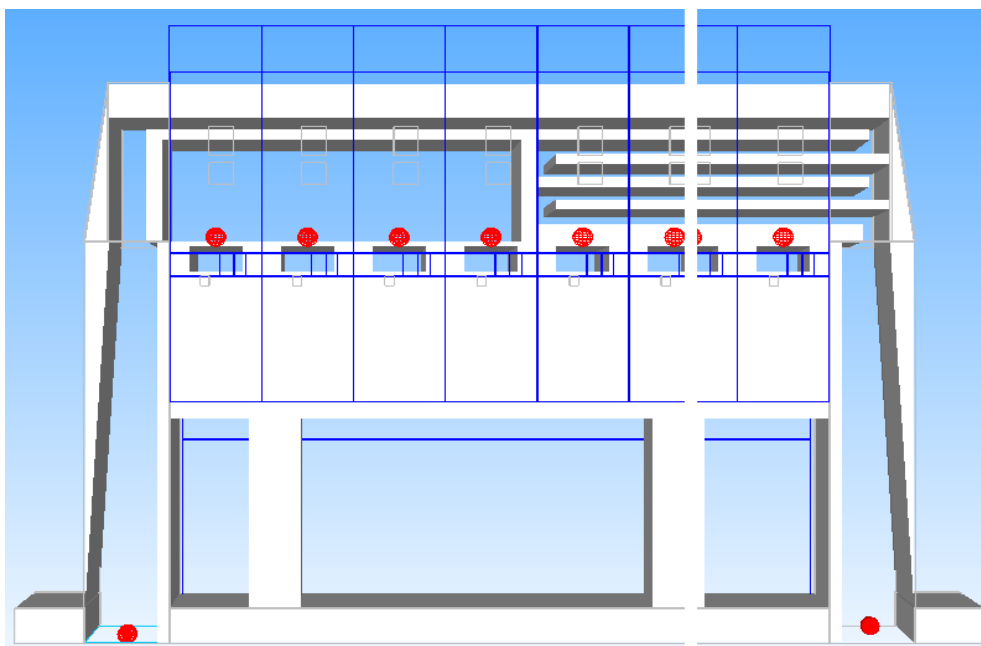


Fig. 81: Diseño basado en 5 canales recortados

Los resultados de temperatura en los TRM frente a la posición relativa que estos ocupan en el Plank asociados a esta nueva iteración son los siguientes:

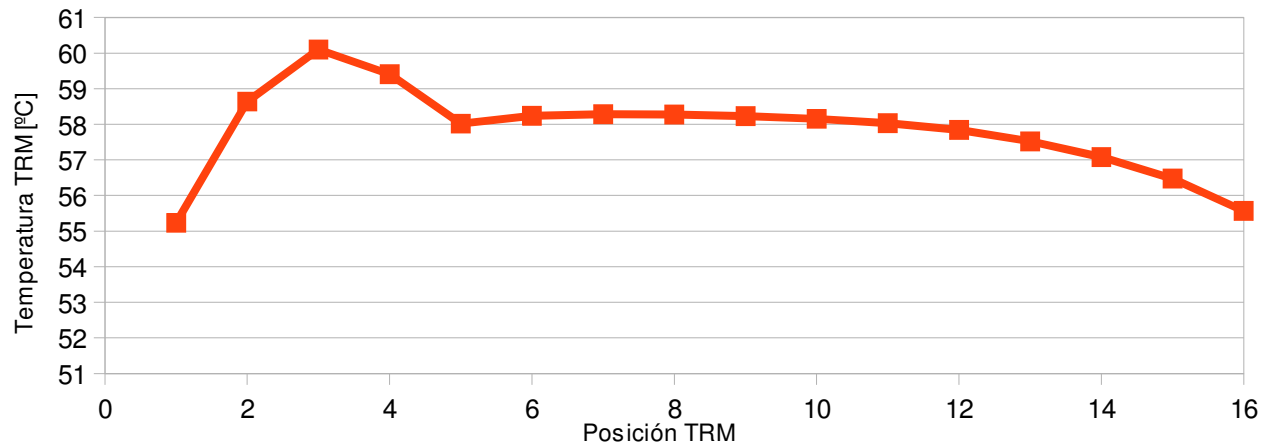


Fig. 82: 5 Canales recortados, Plank 16

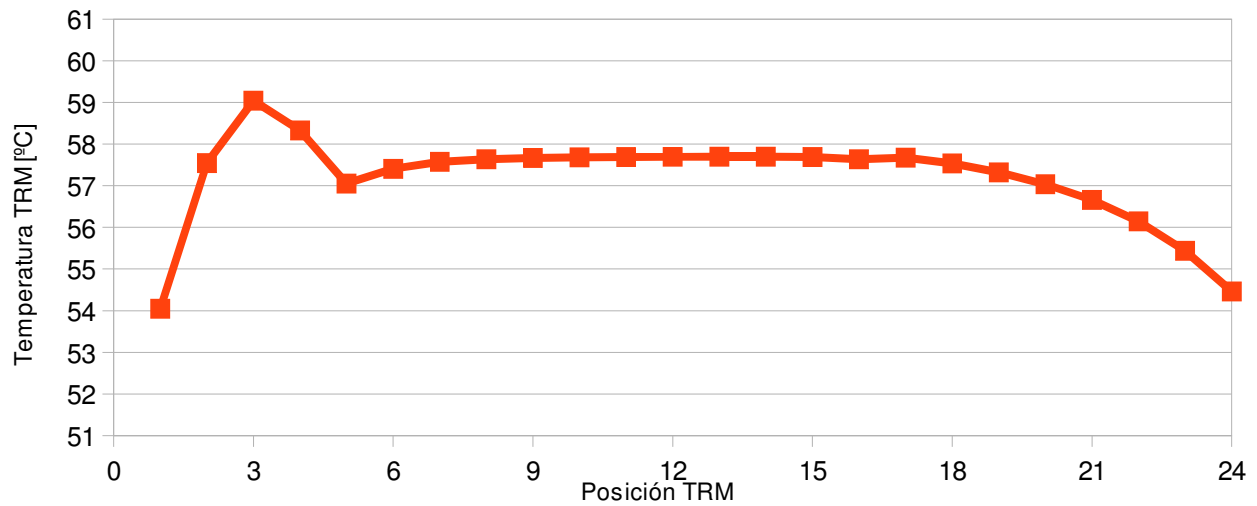


Fig. 83: 5 Canales recortados, Plank 24

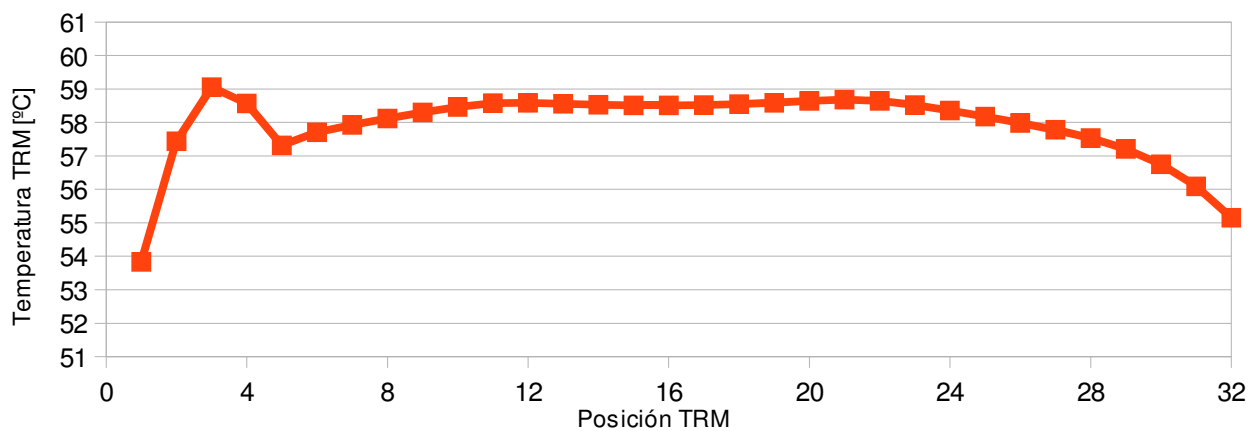


Fig. 84: 5 Canales recortados, Plank 32

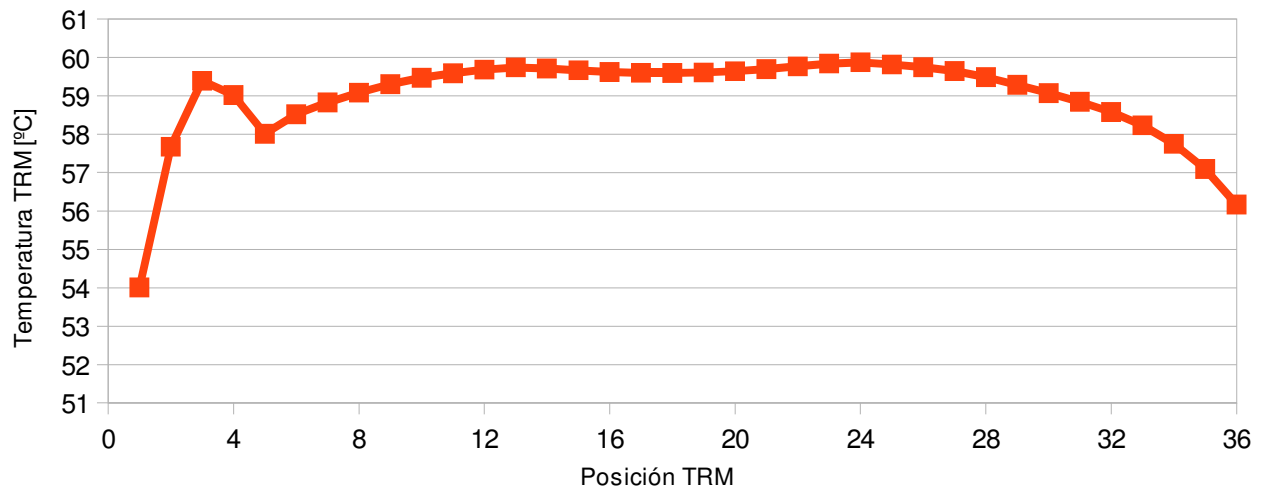


Fig. 85: 5 Canales recortados, Plank 36

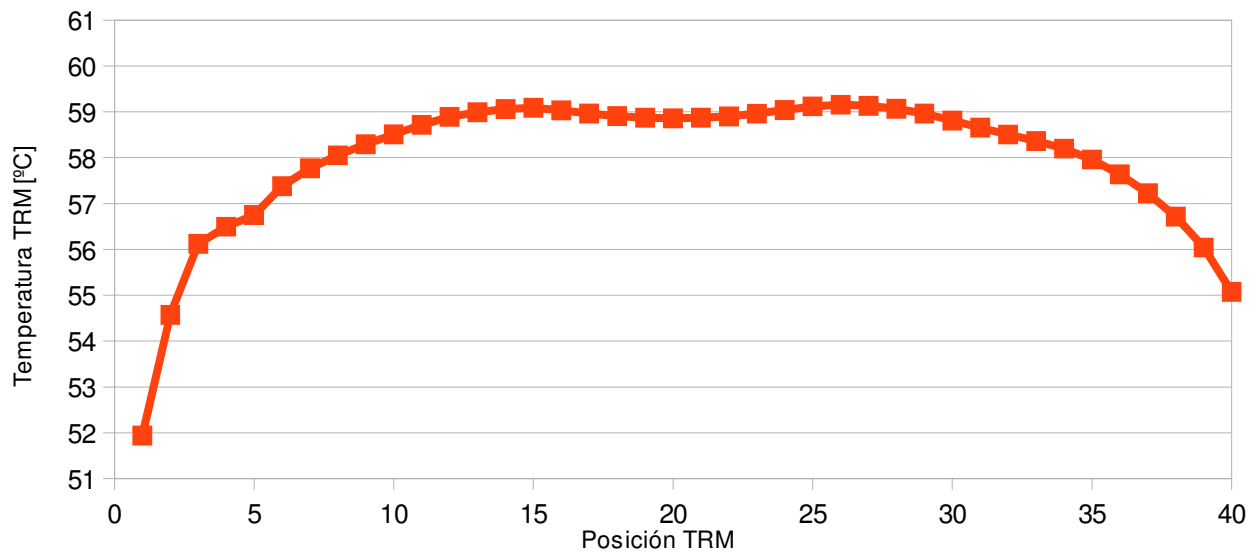


Fig. 86: 5 Canales recortados, Plank 40

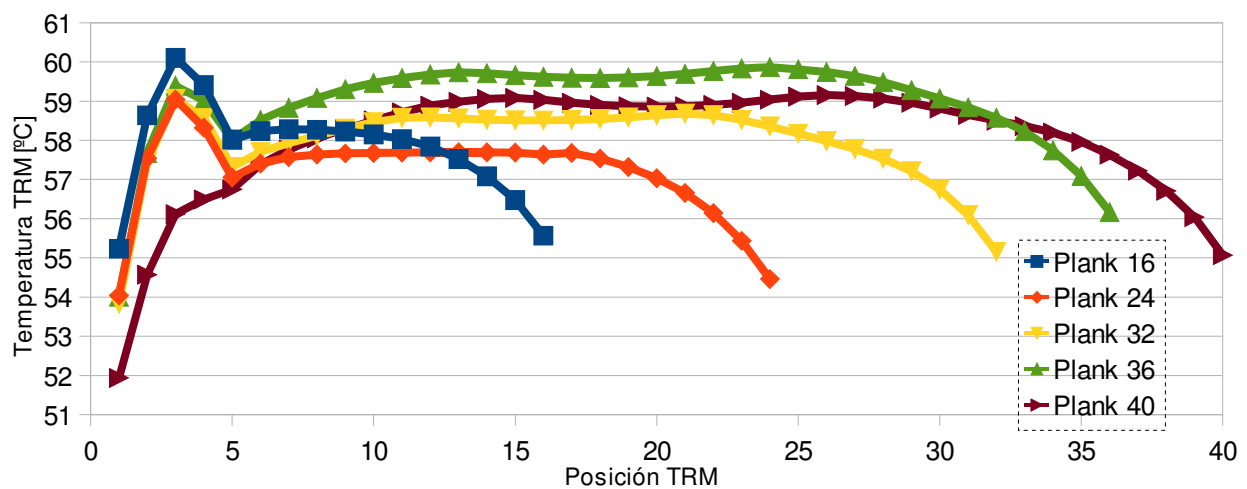


Fig. 87: 5 Canales recortados, todos los Plank

Del mismo modo que se ha hecho en apartados anteriores, a partir de la gráfica de la Figura 88, podemos construir la siguiente tabla de resultados:

Tabla 11: Salto térmico, diseño de 5 canales rec.

5 C-RECORT	T _{máx} [°C]	T _{mín} [°C]	ΔT [°C]
Plank 16	60,10	55,23	4,87
Plank 24	59,04	54,04	5,00
Plank 32	59,06	53,83	5,23
Plank 36	59,87	54,01	5,86
Plank 40	59,15	51,94	7,22

En principio, se puede apreciar como todos los valores de diferencia de temperatura se encuentran dentro del rango impuesto por la especificación tal y como era de esperar. Sin embargo, para verificar que la idea que motivó esta nueva iteración de diseño era cierta resulta imprescindible comparar estos resultados con todos los obtenidos hasta el momento:

Tabla 12: Resumen resultados de las 4 configuraciones

Plank	3 C. ΔT [°C]	3 C-R ΔT [°C]	5 C. ΔT [°C]	5 C-R ΔT [°C]
16	8,56	5,47	5,88	4,87
24	10,64	6,97	6,80	5,00
32	13,73	8,12	7,67	5,23
36	13,29	9,82	8,15	5,86
40	11,55	9,15	8,06	7,22

Como se puede observar en la Tabla 12 se ha representado una comparativa con el resultado de la diferencia de temperatura para cada uno de los casos de diseño y para todos los modelos de Plank en cada caso.

Continuando con la estética general del documento, se ha representado en color **rojo** todos aquellos valores que exceden del valor de 10°C que marca la especificación y en **verde** todos aquellos que se encuentran por debajo. Además, en fondo **azul** se muestra el menor valor de cada fila, puesto que representa para cada Plank el diseño que mejor se ajusta a la especificación desde el punto de vista térmico.

Como se esperaba, el caso de los 5 canales recortados ha resultado ser el que mejores valores para todos los modelos de Plank. De ser necesario, cada Plank puede incorporar el diseño que arroje mejores resultados, sin embargo, el hecho de que todos coincidan en el mismo diseño conseguirá simplificar el proceso de fabricación del conjunto y, por tanto, los costes asociados a la misma.

Una vez seleccionado un diseño para todos los modelos de Plank, es necesario recopilar el resto de información asociado al proceso de resolución del sistema. En este caso y, con el fin de verificar que los diseños se encuentran dentro de lo establecido en la especificación, nos centraremos en obtener los valores de temperatura máxima en los componentes y caída de presión en cada uno de los circuitos.

5.6 El Distribuidor-Colector

Tal y como se explicó en el Capítulo 5.3, el objetivo de este apartado será el dimensionamiento de:

- Las 44 boquillas que conectan el Distribuidor con el Plank.
- El diámetro del cilindro que conecta el Distribuidor con el canal que se encarga de la refrigeración de las unidades IFF y la unidad BFU.

Este proceso consistirá en un algoritmo iterativo que partirá de un diseño inicial y tratará de converger en el menor número de iteraciones posible en una solución válida.

Para la realización de este estudio necesitaremos la siguiente información:

- El fichero que contiene la geometría de partida del Distribuidor.
- Caída de presión en cada uno de los Plank para el diseño final del caudal de refrigeración. Estos datos se obtuvieron a lo largo de los apartados anteriores dentro del Capítulo 6.
- Caudal total de entrada de refrigerante al sistema.
- Caudal consumido por cada una de las unidades que están conectadas al sistema.
- Propiedades del fluido.
- Máxima caída de presión admisible en todo el sistema.

Para el diseño del algoritmo partiremos de las siguientes hipótesis y criterios de diseño:

- El tamaño de las boquillas es tan pequeño en comparación con el tamaño del canal de distribución que el caudal que escape por cada boquilla no dependerá de la posición que esta ocupe en el Distribuidor (no obstante, mediante la primera iteración se tratará de demostrar que esta hipótesis es cierta)
- En el caso de ser cierta la hipótesis anterior, todos los Plank con idéntico número de TRM tendrán la misma boquilla para disminuir los costes asociados al número de boquillas
- Para contabilizar la obturación que supone atravesar los Plank (que no serán modelados en este análisis pero, obviamente si hay que tener en cuenta el efecto que producen sobre el circuito hidráulico), las salidas de fluido hacia los mismos se modelarán como aperturas con la presión correspondiente a cada Plank uniformemente distribuida a lo largo de la superficie de escape.
- Para la misma presión a la salida de dos boquillas, el caudal será mayor por la boquilla de mayor diámetro y viceversa.
- Si existe un grupo de boquillas que tenga exceso de caudal, debe haber otro(s) grupo(s) de boquillas que tenga defecto de caudal y viceversa.
- En el caso que una salida tenga exceso de caudal podrá corregirse de dos maneras:
 - ⤴ Disminuyendo el diámetro de las boquillas del grupo que tenga exceso de caudal.
 - ⤴ Aumentando el diámetro de las boquillas de otro grupo que tenga caudal en defecto.

Para poder llevar a cabo las iteraciones necesarias partiendo de la información anterior será necesario seguir los siguientes pasos desde el principio hasta el final para cada una de las siguientes iteraciones. Como se podrá comprobar a continuación, debido a la gran complejidad del modelo que se va a construir, el tiempo de preparación y resolución para cada iteración es muy elevado, por lo que resultará imprescindible realizar un análisis exhaustivo para conseguir un doble objetivo:

- Comprobar que en todo momento el modelo funciona correctamente y arroja resultados coherentes con el fin de no hacer iteraciones en balde.
- Conseguir el máximo nivel de convergencia posible, de forma que alcancemos una solución válida en el menor número de las mismas posible.

Paso 0: Preparación de la geometría

Una vez terminado el proceso descrito en el apartado 5.3 el estado del sólido que representa el volumen del fluido que queda en el Distribuidor será el representado en la Figura 88 en la que si aumentamos la vista correspondiente a una de las boquillas encontramos la siguiente geometría:

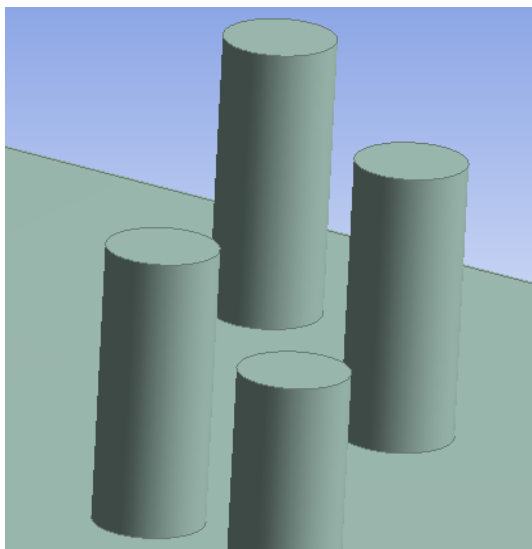


Fig. 88: Estado inicial de las boquillas

Como se puede observar en la imagen anterior, el estado de las salidas es un conducto cuya terminación es un plano perpendicular al eje de salida. Esto no se asemeja a la realidad, por lo que será necesario introducir una forma de tronco de cono de 120° que simule, a modo de tobera, la geometría de la boquilla de adaptación al Plank, lo cual representa un problema desde el punto de vista operativo ya que, al tratarse de un proceso de diseño, la geometría es el resultado final del proceso de iteración, por lo que, a priori, resulta imposible saber el diámetro de salida del cono que hay que colocar en cada una de las boquillas. Para solventar esto, disponemos de dos opciones:

- ▲ La primera de ellas pasaría por emplear el mismo programa de CAD que se empleó en el apartado 5.3 para añadir un conjunto de operaciones más que generen y sitúen los conos en su posición. El problema que representa es que, al tratarse de un proceso iterativo, será necesario realizar estos 44 grupos de operaciones tantas veces como iteraciones realicemos, lo cual puede llegar a ser una tarea repetitiva y que no aportaría conocimiento. Esto es así debido a que, al exportar-importar la geometría a ANSYS® Workbench, es necesario hacerlo mediante un fichero que únicamente contiene información de puntos, líneas y superficies que componen el sólido, por lo que se pierde el carácter vectorial de la pieza que disfrutábamos en el programa de CAD, impidiendo que podamos realizar modificaciones en los conos entrando directamente sobre las variables que los definen por haber perdido dicha información.
- ▲ La segunda opción pasa por generar dichas boquillas directamente en la herramienta de

CAD que incorpora ANSYS® Workbench. De esta forma, pese a que el trabajo de generación y colocación de las boquillas es exactamente el mismo, éstas no perderán en ningún momento el carácter vectorial, de forma que, llegado el momento de pasar a una nueva iteración, podremos modificar el valor de los diámetros de salida de las boquillas con cambiar el número que define dicha variable en cada uno de los conos.

El proceso para generar estas boquillas por tanto sería el siguiente:

- Generar el cono mediante una forma primitiva simple.
- Rotarlo sobre sus ejes para ponerlo en posición vertical mediante el empleo del comando “BodyOperation”
- Trasladarlo a la posición que le corresponda en el Distribuidor mediante el empleo del comando “BodyOperation”
- Ajustar las variables para que la boquilla tenga las dimensiones adecuadas para poder realizar la iteración inicial.
- Repetir para las 44 boquillas

Tras realizar todas estas operaciones, el resultado que conseguiremos será el siguiente:

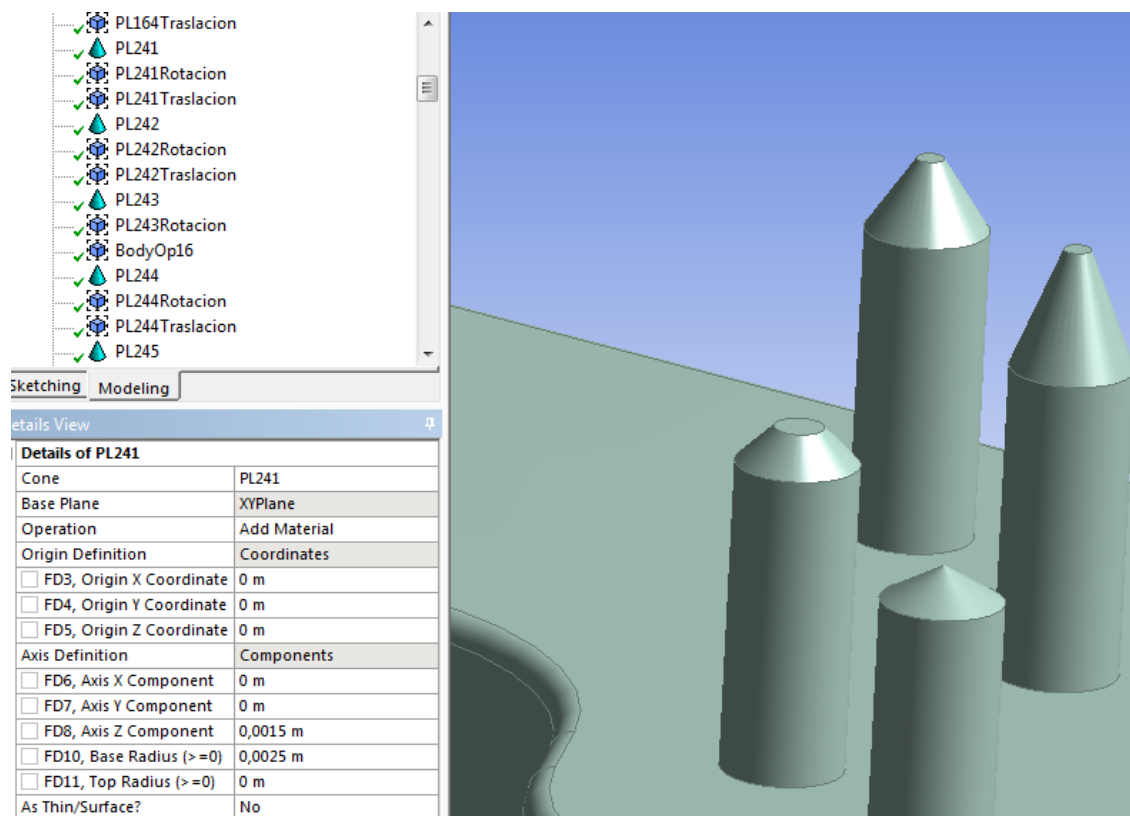


Fig. 89: Boquillas parametrizadas

Tal y como se explicó en el funcionamiento de Desing Modeller, una vez terminado el proceso de generar y ubicar las boquillas el resultado es el que se puede apreciar en la Figura 90. En la ventana superior izquierda, están presentes todas las modificaciones que se han realizado hasta alcanzar el estado actual de la geometría. En este caso en particular se encuentran ordenadas los conos que modelan las boquillas además de su correspondiente operación de rotación y traslación. Además, si seleccionamos cada una de estas boquillas, en la ventana inferior izquierda aparecen los detalles de la primitiva como su nombre, el plano que define su orientación, si añaden o restan material al resto de la geometría y las variables propias que la definen. En el caso de un cono, estas variables son:

- Radio de la base inferior
- Radio de la base superior
- Altura desde la base superior a la base inferior

Esta forma de trabajo nos permitirá tener el control total de la geometría de las boquillas con solo variar los parámetros que las definen una vez realizado el trabajo de generarlas y colocarlas en su correspondiente posición. En la Figura 89 se puede observar diferentes geometrías de boquillas que se pueden obtener jugando con estos parámetros.

Además de con las boquillas, será necesario repetir este proceso con el cilindro que conecta el Distribuidor con el circuito de refrigeración de la IFFBFU. El procedimiento será similar al anteriormente descrito teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- En este caso, la geometría a parametrizar (cilindro) ya existe, por lo que previamente será necesario realizar una operación de borrado del mismo. Esto se realizara mediante una extrusión (de borrado) sobre la base del mismo y que ocupe su longitud completa y, al menos un diámetro superior a su área sin crear interferencia con el resto de la geometría. Esta operación se puede observar en la primera fila de la ventana de operaciones (situada en la zona superior izquierda de la Figura 90)
- La primitiva esta vez será un cilindro macizo en lugar de un cono (segunda fila en la ventana de operaciones).
- El procedimiento de rotación y traslado es exactamente igual que en el caso de las boquillas (Tercera fila en la ventana de operaciones).

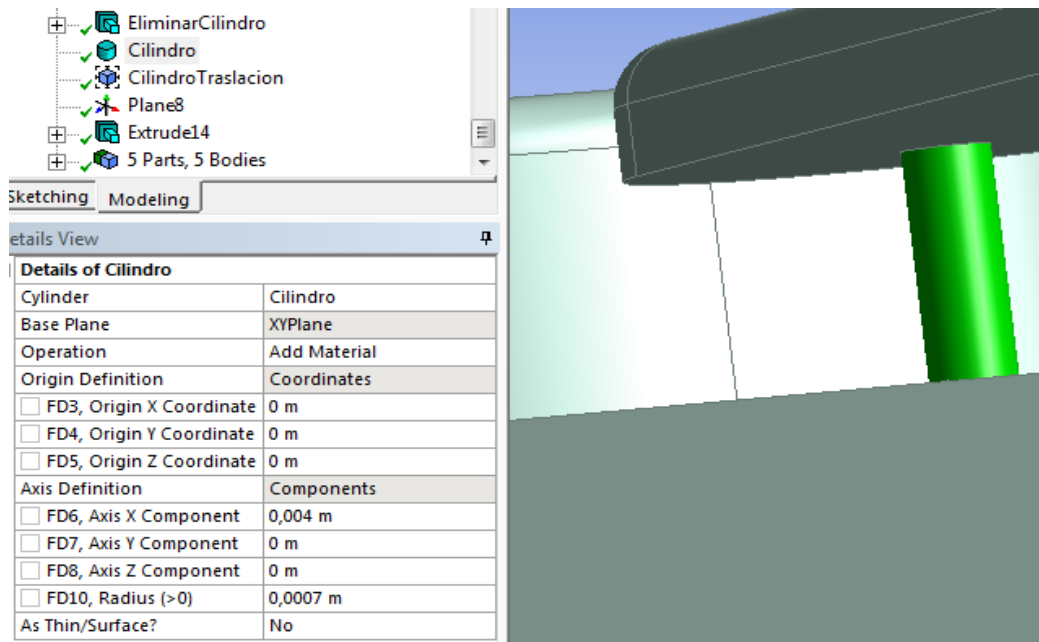


Fig. 90: Parametrización del cilindro

Una vez parametrizado el cilindro, y quedando así la geometría completamente terminada, es necesario proporcionar unos nombres adecuados a las superficies que más adelante emplearemos para definir las condiciones de contorno del sistema, esto es, los lugares por los que entrará y saldrá el fluido al circuito para que esa futura tarea resulte más sencilla y no sea necesario realizarla cada vez que se necesite realizar una nueva iteración. Por este motivo, resultará imprescindible nombrar a dichas superficies con un código alfanumérico que permita identificar rápidamente su posición en el Distribuidor para relacionarlas con sus correspondientes resultados. Los nombres que se utilizarán durante todo el análisis serán los siguientes:

- “Entrada” para la superficie que define la única entrada de fluido al sistema:

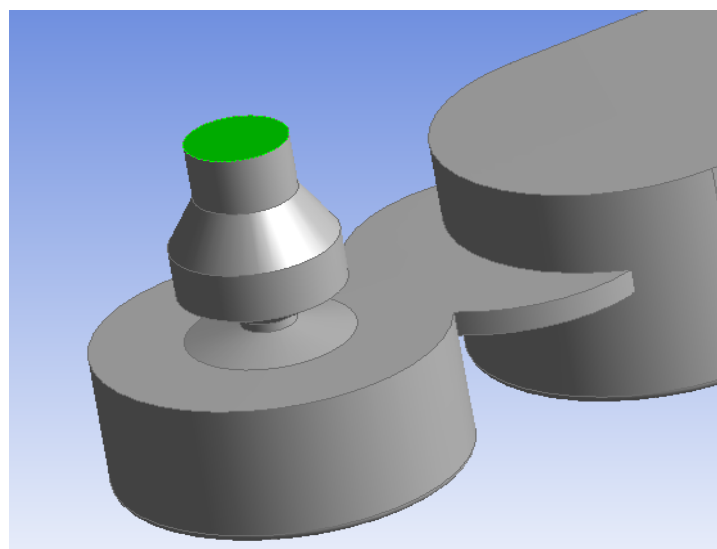


Fig. 91: Entrada de fluido al sistema

- “IFFBFU” para la superficie que define la salida del fluido que previamente ha enfriado la pared en contacto con el módulo IFF y que a continuación pasará a enfriar el módulo BFU:

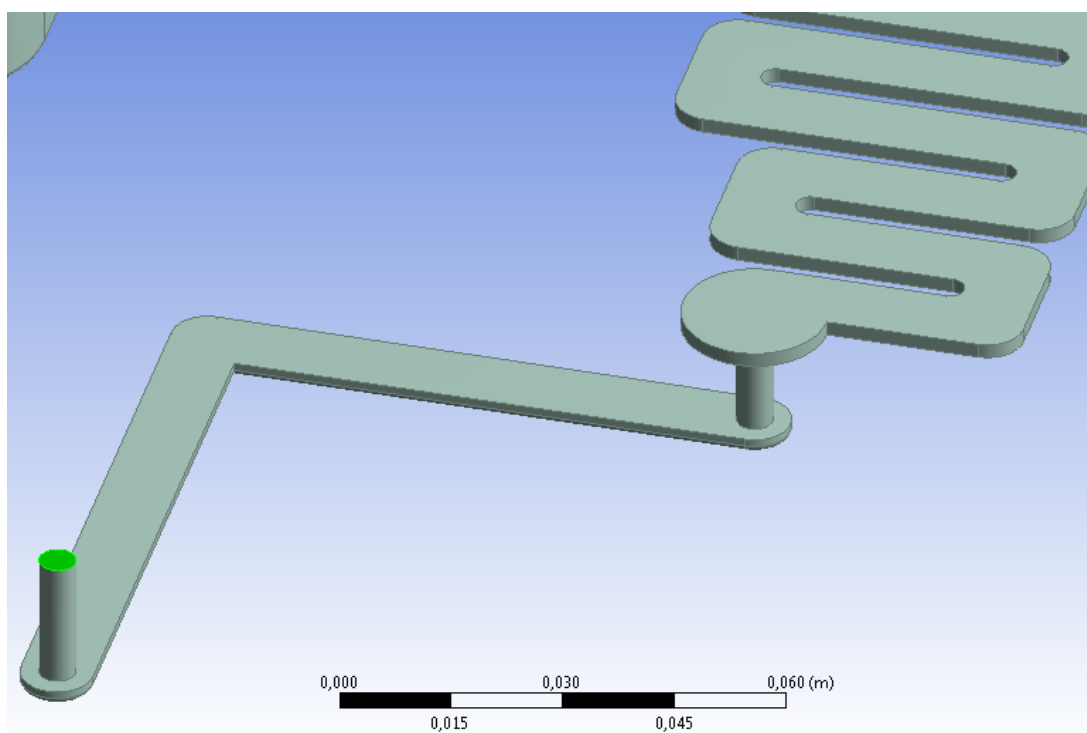


Fig. 92: Salida hacia la unidad BFU

- “PLXXYY” para las superficies que corresponden a cada una de las boquillas de los Plank donde:
 - XX hace referencia al número de TRM que contiene dicho Plank:
 - 16, para los Plank que portan 16 TRM
 - 24, para los Plank que portan 24 TRM
 - 32, para los Plank que portan 32 TRM
 - 36, para los Plank que portan 36 TRM
 - 40, para los Plank que portan 40 TRM
 - YY hace referencia al número de Plank teniendo en cuenta las siguientes restricciones:
 - 01 al 04 para los Plank de 16 TRM
 - 01 al 08 para los Plank de 24 y 32 TRM
 - 01 al 12 Para los Plank de 36 y 40 TRM

- Puesto que (con la excepción de los Plank con 40 TRM) todos los Plank de igual número de TRM se encuentran divididos en dos grupos de forma simétrica, se comenzará a nombrar por el que se encuentra en el extremo exterior en el lado de la IFFBFU y se seguirá nombrando hacia el interior del Plank. Una vez llegado al final de la línea se pasará al otro extremo a nombrar una vez más desde fuera hacia adentro como muestra la siguiente imagen para el caso de los Plank correspondientes a 24 TRM:

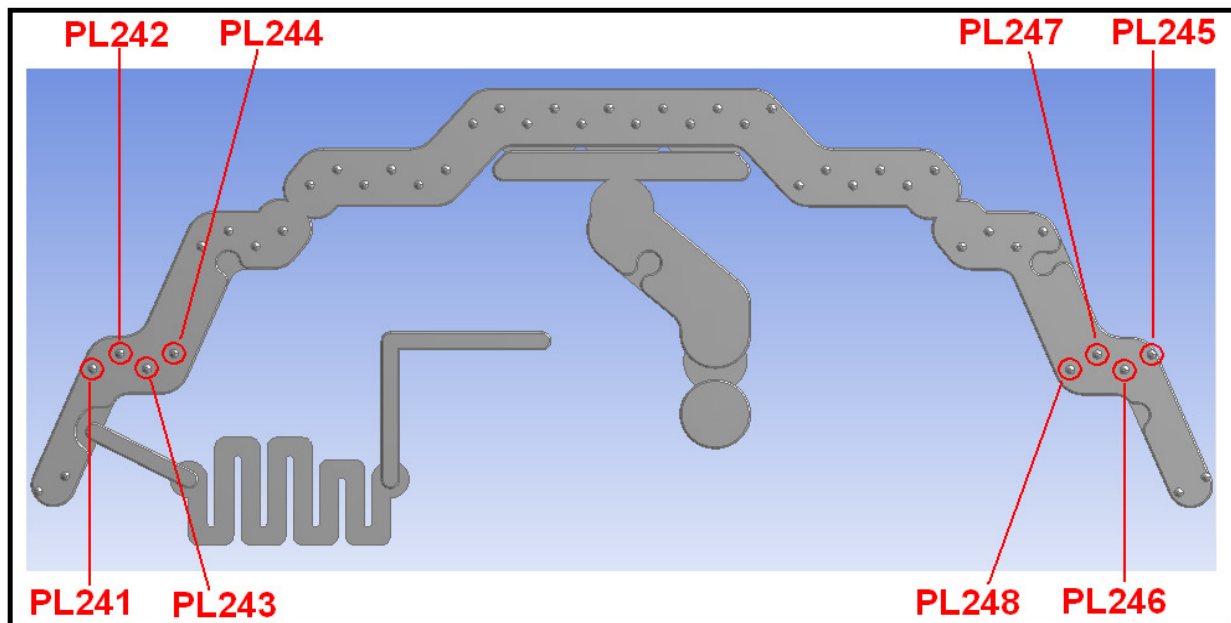


Fig. 93: Esquema de los nombres de las salidas

Por último y a modo de anotación, explicar que a este paso se le ha dado el nombre de “cero” debido a que no forma parte del algoritmo en si ya que se trata de una preparación previa al trabajo iterativo.

Paso 1: Definición de la iteración

Este es el primer paso que habrá que dar en el proceso de convergencia hacia la solución final que cumpla con los requisitos explicados anteriormente. Consistirá en introducir los diámetros que representan la salida de fluido a través de las boquillas.

Esto habrá que hacerlo en el módulo geométrico Desing Modeller tal y como se explicó en el Paso 0 y, aunque pueda parecer un proceso sencillo (pues bastará con introducir 45

números al programa) es, sin embargo, el más importante de todos ya que de nuestro “buen ojo” y acierto a la hora de seleccionar estas variables dependerá en gran medida el número de iteraciones que serán necesarias y, por tanto el tiempo asociado a las mismas que como se podrá comprobar, más adelante, es muy elevado.

A medida que se completen iteraciones se rellenarán dos tablas acumulativas como las siguientes que registrarán los diámetros de las boquillas seleccionados (variables de entrada) para cada iteración así como el porcentaje de caudal que abandona el sistema por cada una de las boquillas (variables de salida).

Tabla 13: Parámetros de entrada de cada una de las iteraciones

Plank [Nº de TRMs]	Iteración1 [mm]	Iteración2 [mm]	Iteración3 [mm]	...	Iteración N [mm]
16	1,5				
24	1,5				
32	1,5				
36	1,5				
40	1,5				
Cilindro	5				

Tabla 14: Resultados de las iteraciones

Plank	Teórico	Iteración1	Iteración2	Iteración3	...	Iteración N
PL161						
PL162						
PL163						
...						
PL4012						
IFFBFU						

Paso 2: Mallado

Será una parte fundamental del análisis y de la buena elección de los parámetros que lo componen dependerá en gran medida el éxito o fracaso de los resultados. Para este caso de análisis, el estado general de la malla que se ha empleado es el siguiente:

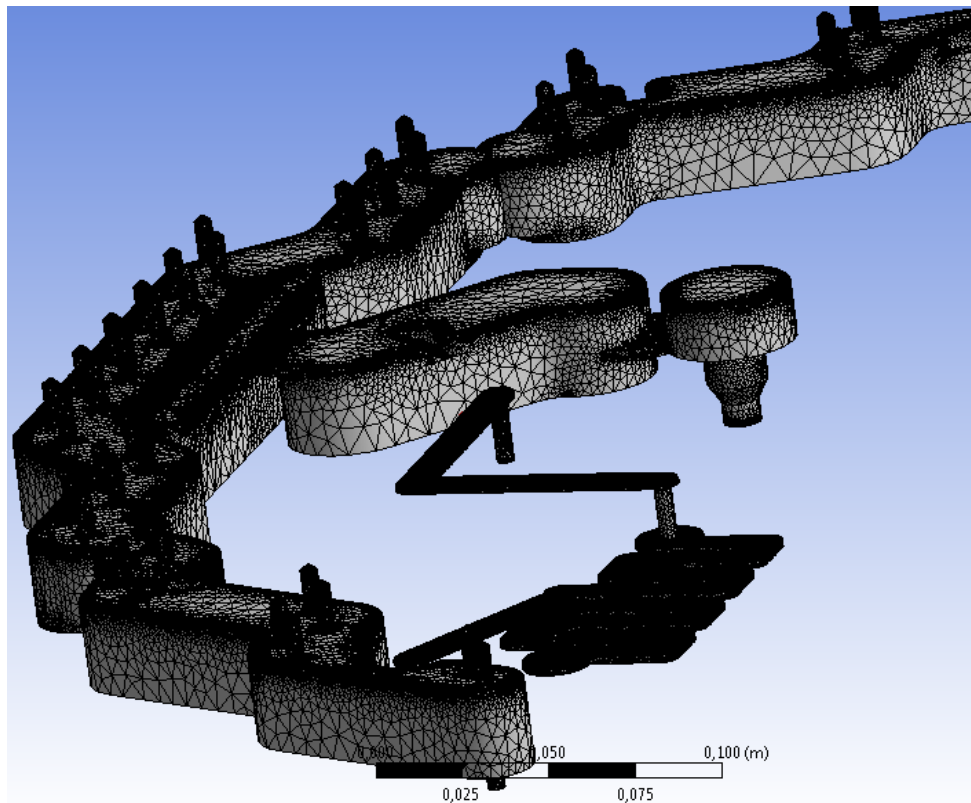


Fig. 94: Visión global del mallado

Sin embargo, como puede observarse en la imagen de la Figura anterior, el mallado que se ha obtenido tiene ciertas particularidades que consiguen que sea especialmente heterogéneo. Esto es debido a que los parámetros de entrada al programa han sido introducidos con arreglo a obtener un mallado que se adecue a las particularidades de este análisis. Las variables que se han introducido para conseguir esta malla son:

- ▲ Tipo de malla: Consiste en elegir un algoritmo de mallado predefinido por el programa que admitirá un cierto grado de libertad a la hora de introducir ciertos parámetros de mallado. En este caso se ha elegido un mallado de tipo “Path Independent”. Esta elección se basa en gran medida a que es la opción recomendada por ANSYS® Workbench para geometrías extremadamente complejas como esta ya que como su propio nombre indica, genera un mallado “independiente del camino”, entendiendo por “camino” la geometría que el programa de mallado recibe como elemento de entrada y sobre la que se tiene que basar para generar la malla. Esto significará que el algoritmo de mallado tratará de respetar en la medida de lo posible las restricciones que le impone la geometría sin llegar al extremo de generar una malla defectuosa por el hecho de tratar de asemejarse al 100% a la misma. Además de esto último, será en este punto donde introduciremos los parámetros globales de control de la malla como son:

- Tamaño máximo: 30mm
- Tamaño mínimo: 1mm

- Ángulo mínimo: 30°

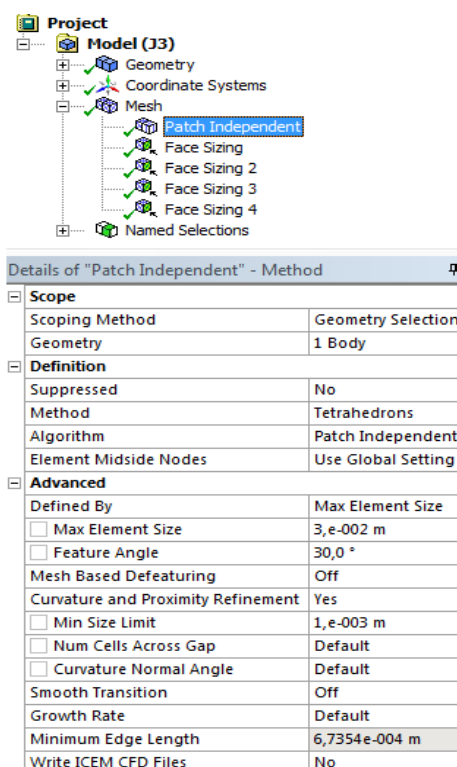


Fig. 95: Detalle del tipo de malla

- △ Refinamiento de la malla en la Entrada, la IFFBFU y las 44 boquillas: A parte de los parámetros globales introducidos en el apartado anterior, resultará de gran importancia introducir excepciones de mallado, esto es, zonas que por su ubicación requerirán especial atención por nuestra parte y necesitaremos que los resultados localizados sean muy precisos. Ese es el caso de las entradas y salidas de fluido al sistema por lo que, como se puede observar en la siguiente imagen, se ha creado una excepción de mallado para las mismas en la que en ambas zonas, el tamaño se forzará a una décima de milímetro (0.1mm).

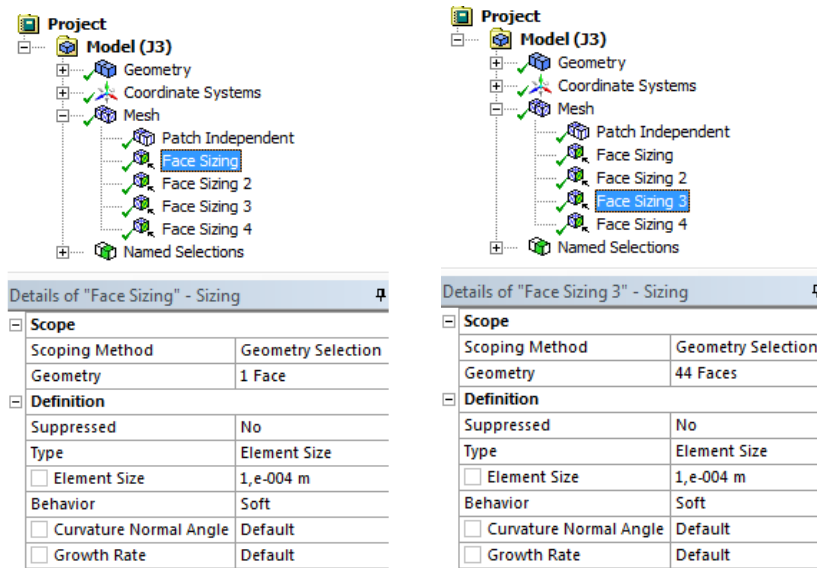


Fig. 96: Excepción de mallado en la Entrada, la salida IFFBFU y las 44 boquillas

- Refinamiento de la malla en el cilindro: Al igual que ocurrió con las superficies explicadas en el apartado anterior, resultará conveniente realizar una excepción de mallado para la superficie exterior del cilindro que conecta con el circuito de refrigeración de la IFFBFU, solo que en este caso se ha generado la misma con un tamaño de elementos de 5 décimas de milímetro debido a que se necesita elevada precisión en la zona para que tenga una perfecta forma del cilindro que se pretende modelar pero sin añadir excesivos elementos al sistema puesto que los resultados no se extraerán del propio cilindro, sino de la salida de su rama.

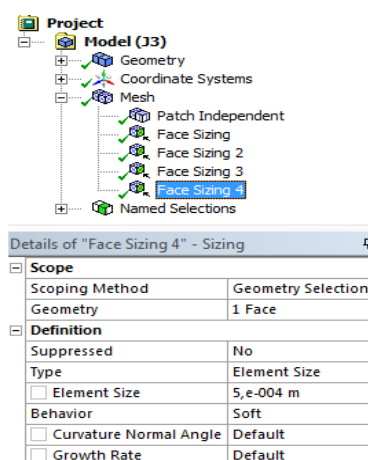


Fig. 97: Excepción de mallado en el cilindro

- Resumen del mallado: Por último, basta con introducir la física y el solver que se empleará para posteriormente iniciar el proceso y obtener la malla que se muestra en la Figura 94 compuesta por un total de 2.227.557 elementos.

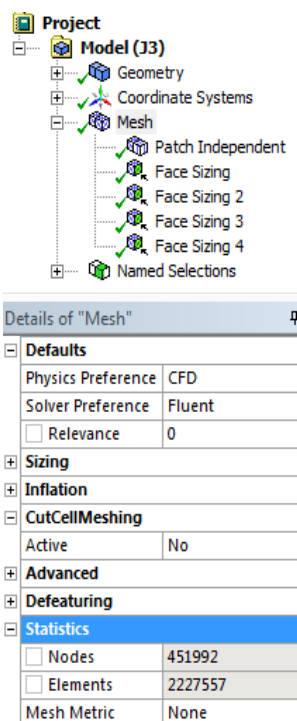


Fig. 98: Resumen de mallado

Paso 3: Pre-proceso

Una vez completado el apartado anterior, será necesario exportar el fichero que contenga la malla para posteriormente importarlo en el módulo de pre-proceso (aunque como ya se ha comentado en la descripción de la herramienta, ANSYS® Workbench realiza esta operación automáticamente)

Será en el apartado de Pre-proceso en el cual se introducirán todas las variables físicas y condiciones de contorno necesarias para que el sistema tenga sentido físico y al mismo tiempo pueda ser resuelto en el Solver.

Puesto que se trata de un análisis fluido-dinámico, se comenzará por declarar el fluido de trabajo. Como se explicó a lo largo del apartado 5 (Modelado del problema), el Distribuidor será la pieza encargada de realizar el reparto de fluido a los Plank, por tanto será el mismo fluido el que recorra a ambos sistemas. Las propiedades que nos importan de este fluido en esta parte del análisis son:

Tabla 15: Propiedades del fluido

Propiedad	Valor
Densidad [Kg/m ³]	1035,5
Viscosidad Dinámica [N·s/m ²]	2,58E-003
Conductividad [W/m·K]	0,38
Calor Específico [J/Kg·K]	3250

La forma de declarar el fluido e introducir las propiedades es mediante los siguientes cuadros de diálogo:

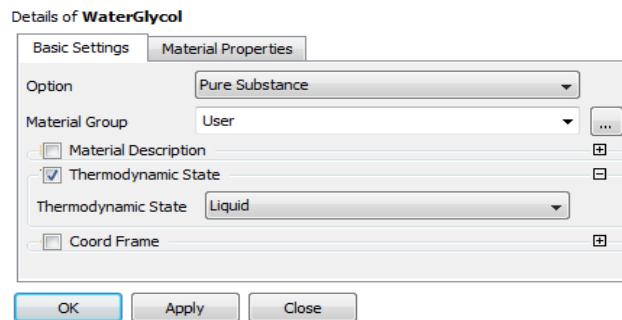


Fig. 99: Declaración del fluido

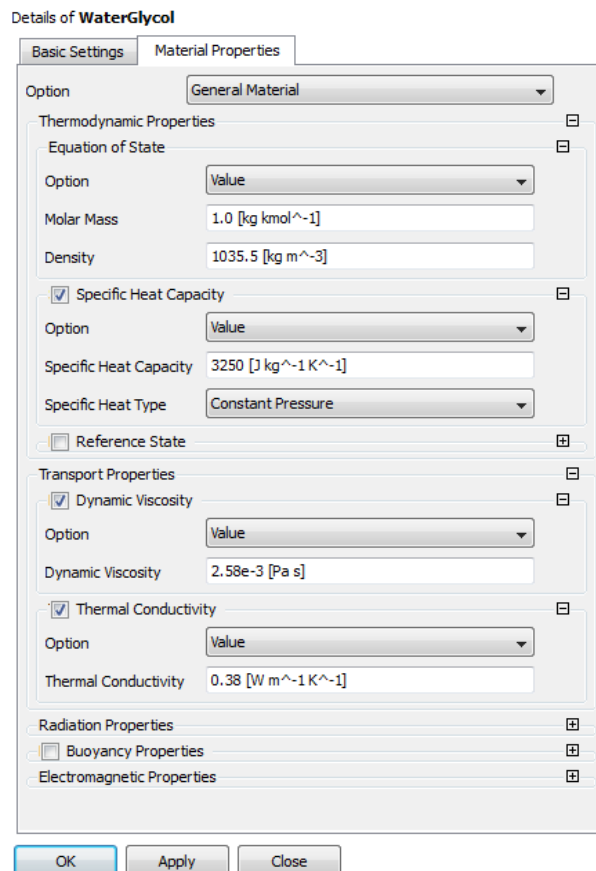


Fig. 100: Propiedades del Water-Glycol

El siguiente paso será declarar los parámetros generales del análisis. Estos se introducirán mediante la ventana cuyas dos pestañas son representadas en la Figura 101 y los más importantes son:

- Fluido de trabajo: El previamente declarado Water-Glycol.
- Fluido continuo, esto es, sin partículas en suspensión.
- Presión de referencia: 1 atm
- Fluido en estado de NO ebullición.
- Dominio del fluido delimitado por paredes estacionarias. Esto hace referencia a que las paredes que delimitan el fluido se encuentran en reposo (esto no tiene porque ser así en el caso de un agitador)
- Isotérmico: Resultará muy importante hacer esta selección en el menú desplegable correspondiente debido a que no existen fuentes de calor de importancia que afecten al Distribuidor, por lo que el aumento de temperatura que cabe esperar de todo el flujo de caudal a lo largo del mismo sea de apenas unas décimas de grado en la práctica despreciables. En el caso de no declarar el sistema como isoterma, en principio debería resolverse de igual forma, solo que además de las ecuaciones de continuidad y de turbulencia, en el apartado siguiente se resolverá la ecuación de conservación de la energía, con el consiguiente problema que ello supondrá de cara a lograr una rápida convergencia.

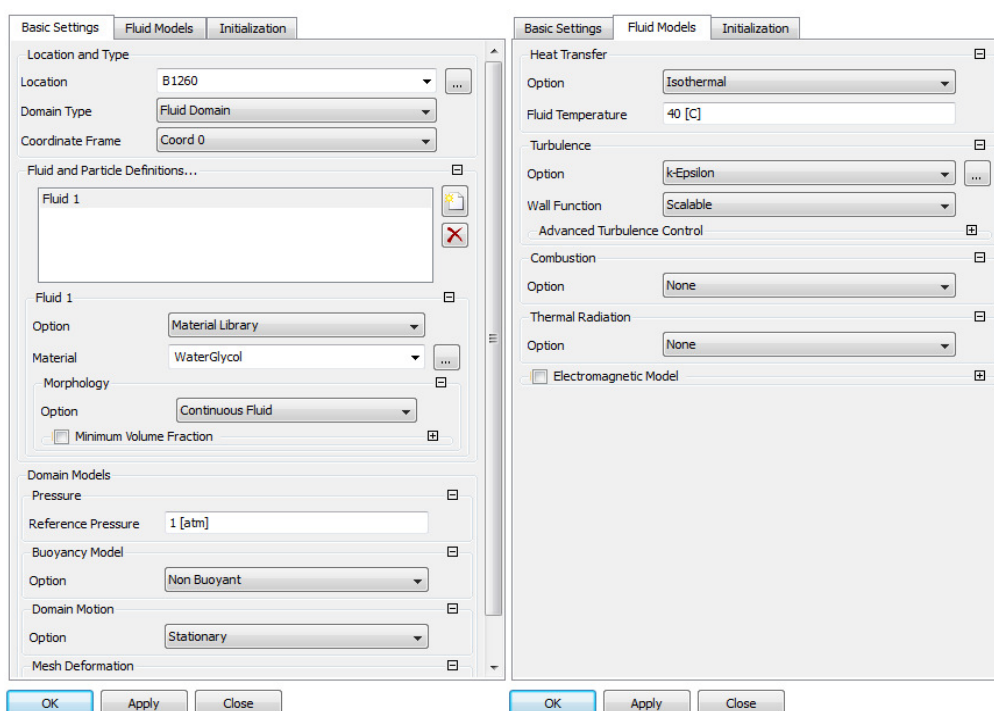


Fig. 101: Detalles del modelo

A continuación declararemos las entradas y salidas que compondrán el sistema. En el caso de una entrada será necesario introducir la siguiente información:

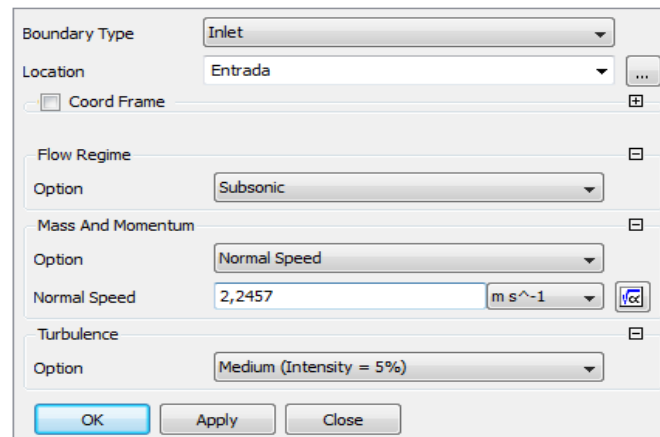


Fig. 102: Declaración de la Entrada

Como se puede observar en la Figura anterior, es necesario introducir la velocidad promedio en la Entrada para definir completamente la corriente de fluido entrante. Para el cálculo de esta variable a partir de los requisitos del sistema bastará con realizar las siguientes operaciones partiendo de los datos conocidos del fluido:

$$Q_{\text{Másico}} = 0.221 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

$$A_{\text{de entrada}} = 9.5 \text{E} - 5 \text{m}^2$$

$$\text{Densidad} = 1035.5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{\text{Volumétrico}} = \frac{(Q_{\text{Másico}})}{(\text{Densidad})} = \frac{\left(0.221 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}\right)}{\left(1035.5 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right)} = 0.0002134 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad (14)$$

$$\text{Velocidad} = \frac{(Q_{\text{Volumétrico}})}{(Área)} = \frac{\left(0.0002134 \frac{(\text{m}^3)}{(\text{s})}\right)}{(9.5 \text{E} - 5 \text{m}^2)} = 2.2457 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (15)$$

En el caso de las salidas de fluido del sistema, habrá que introducir un nombre para simplificar la tarea de post-proceso, así como la presión relativa a la que se descarga que corresponde a la unidad que alimenta dicha salida. La presión se introducirá como una distribución uniformemente repartida a lo largo de la superficie. CFX[®] permite otras distribuciones que no añadirán precisión al análisis y sí complejidad y tiempo de resolución.

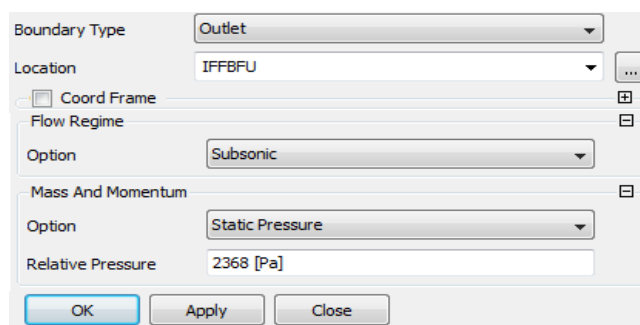


Fig. 103: Declaración de una salida

En siguiente lugar, indicaremos al software que el objetivo del análisis es hallar el estado estacionario del sistema (Figura 104).

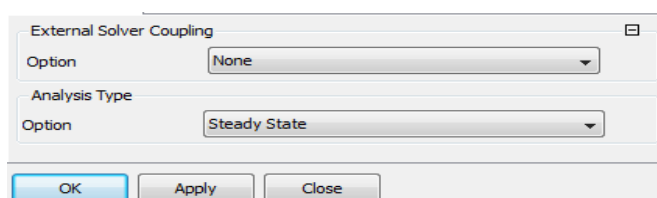


Fig. 104: Selección de estado estacionario

Por último introduciremos las unidades en las que queremos que el solver entregue los resultados para su análisis en el módulo de post-proceso y las condiciones de parada del solver (Figuras 105 y 106):

- Parada por convergencia: $RMS = 10^{-4}$
- Parada por no convergencia: 200 iteraciones

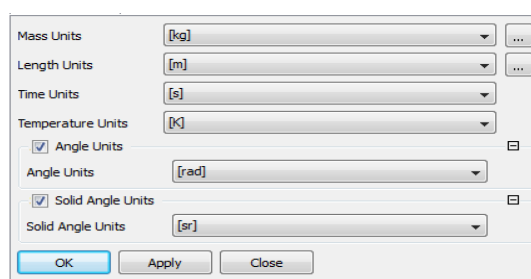


Fig. 105: Unidades de la solución

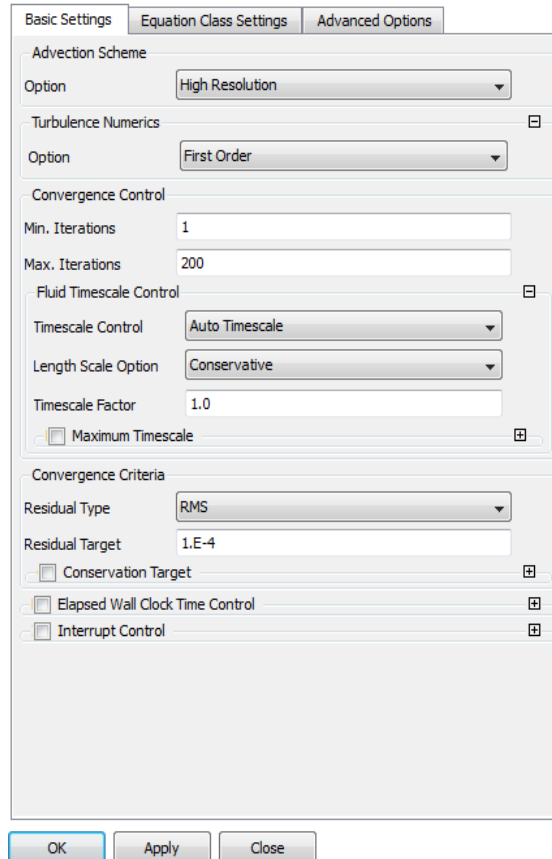


Fig. 106: Condiciones de parada del solver

Paso 4: Solución

Una vez acabada la fase de pre-proceso, el siguiente paso natural será el de la resolución del modelo que hasta ahora se ha creado. En condiciones normales, bastará con inicial el módulo de resolución que incorpora CFX[®] y esperar a que los residuos de las ecuaciones que muestra el módulo alcancen el valor de 1E-4 o, por el contrario, se alcance el número máximo de iteraciones que se estableció en el módulo de pre-proceso. Sin embargo, en este caso, encontraremos que en el transcurso de la solución, los residuos convergen a una velocidad tan elevada que en apenas 3 iteraciones los residuos alcanzan el valor de 1E-6 como se puede observar en la Figura 107:

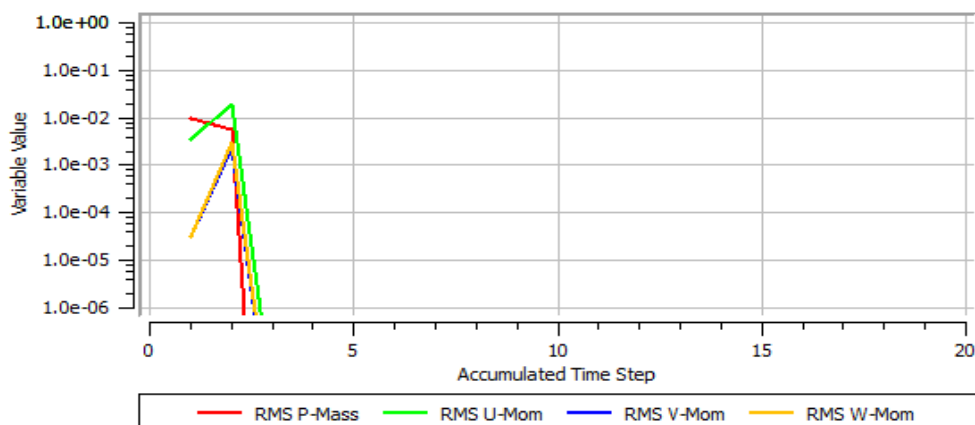


Fig. 107: Evolución de la convergencia

Lo cual, resulta en la práctica imposible para cualquier software FEM lo cual queda aclarado cuando, instantes después, el programa arroja los la siguiente cadena de errores (Figuras 108 a 111):

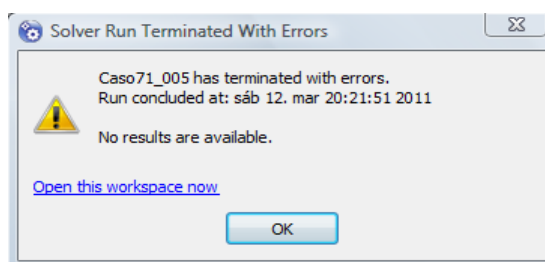


Fig. 108: Error proporcionado por el módulo de resolución

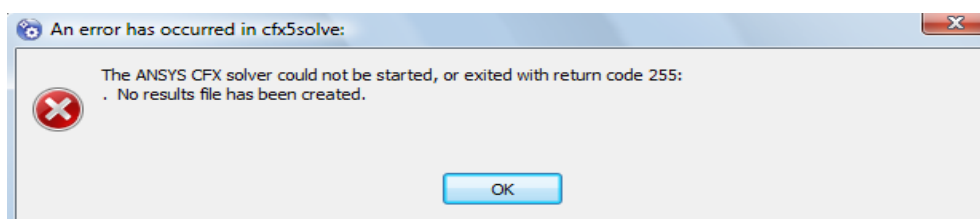


Fig. 109: Segundo error proporcionado por el módulo de resolución

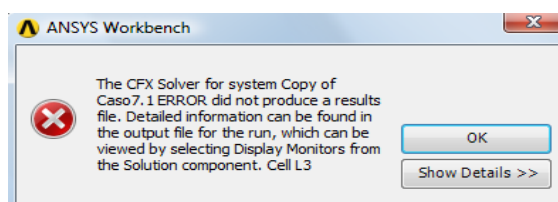


Fig. 110: Error proporcionado por ANSYS Workbench®

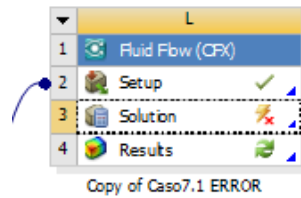


Fig. 111: Estado en que queda el modelo en ANSYS® Workbench

Este problema que ha evitado que el módulo de resolución se complete con éxito ha sido provocado por la gran complejidad del modelo ya que:

- A mayor complejidad de la geometría, mayores problemas de convergencia presentará el modelo.
- A mayor número de salidas, mayores problemas de convergencia presentará pudiendo resultar especialmente complicado a partir de la sexta salida (recordemos que nuestro modelo tiene 45 salidas)

Ante esta problemática, la ayuda del software recomienda intentar lograr una convergencia escalonada de la solución ya que, al tratarse de un proceso iterativo, la solución puede detenerse en cualquier momento de forma que queda “congelada” para posteriormente continuar con distintas condiciones de contorno, más severas que las anteriores con la ventaja de que gran parte del campo fluido se encontrará en un estado próximo a la solución final, por lo que disminuirán las probabilidades de encontrar un error de convergencia (Figura 112).

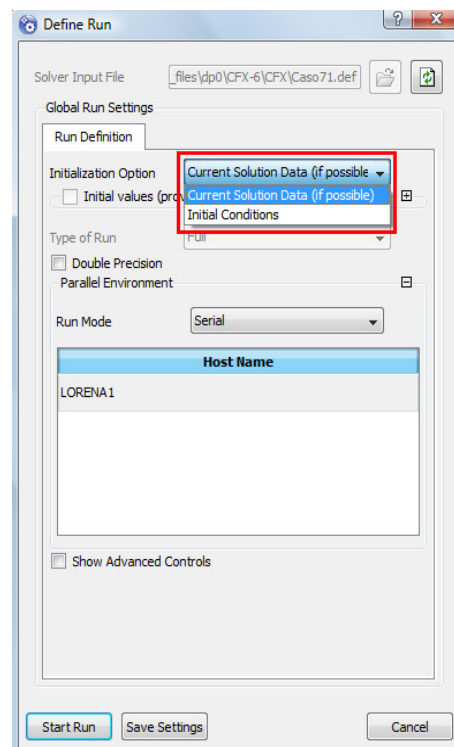


Fig. 112: Iniciar una solución o continuar con otra existente

De este modo y, a partir de la idea anterior, se seguirá el siguiente proceso para lograr una convergencia satisfactoria del sistema:

- En primer lugar, se suprimen todas las salidas asociadas a las boquillas y se impone como una única salida el área marcada en verde en la siguiente imagen, que comprende toda la zona inferior del sistema a excepción de las áreas pertenecientes a las boquillas, de forma que consigamos una rápida y eficaz convergencia de la solución con la garantía de que, salvo las condiciones de caída de presión, la distribución del campo de velocidades en la zona roja será muy similar a la que finalmente obtengamos, de forma que en siguientes iteraciones solo falte por converger la zona de las boquillas.

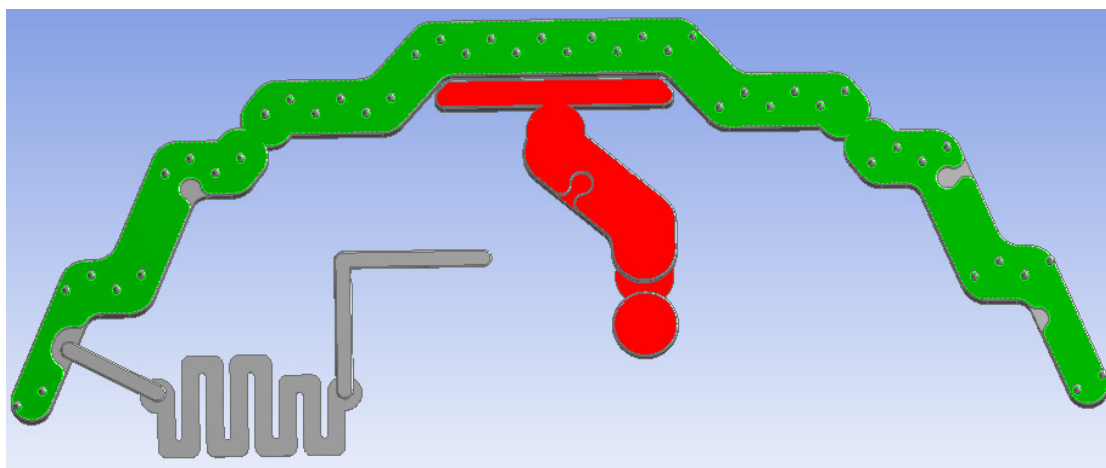


Fig. 113: Primer paso para lograr la convergencia

- El segundo paso para lograr la convergencia final del sistema consistirá en anular la salida anterior y modelar como salidas de fluido del sistema las zonas marcadas en verde de la Figura 114, esto es, la totalidad de las 44 boquillas, de forma que consigamos aproximar la convergencia en todo el Distribuidor salvo los conductos de salida (zona marcada en color rojo en la Figura 115).

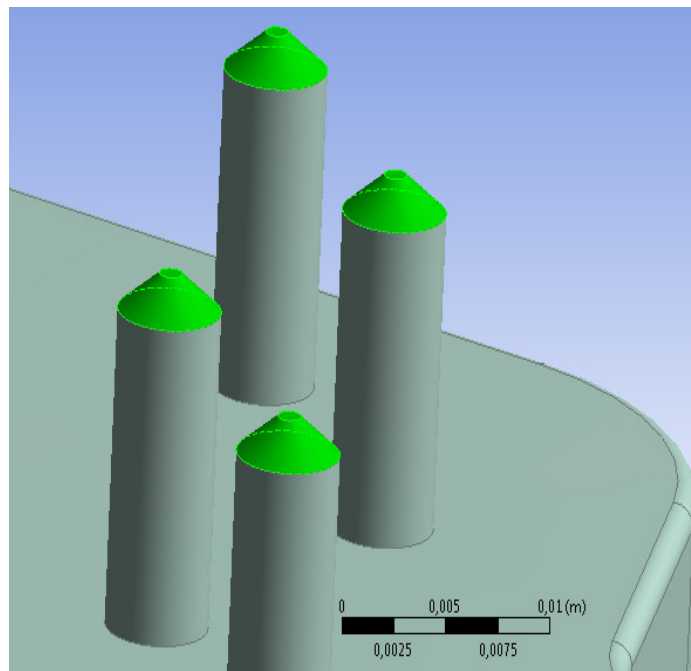


Fig. 114: Segundo paso para lograr la convergencia

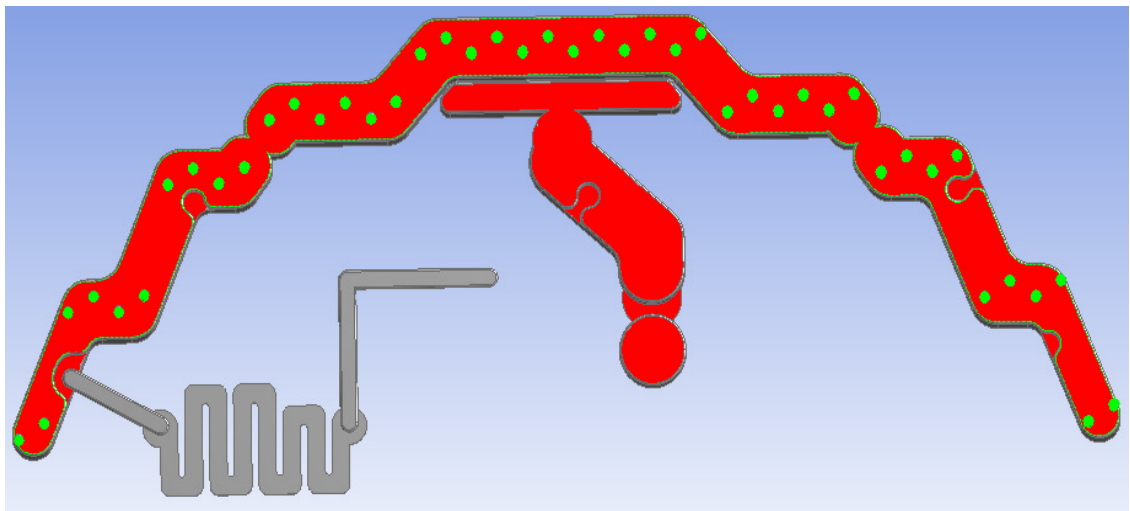


Fig. 115: Segundo paso para lograr la convergencia

- El tercer y último paso consistirá en anular las anteriores salidas para declarar unas nuevas situadas en el área exacta que representa la salida real de las boquillas, de forma que, partiendo de una estado próximo a la solución final, consigamos la convergencia del sistema real. Las nuevas salidas se situarán en las áreas marcadas en verde en la Figura 116:

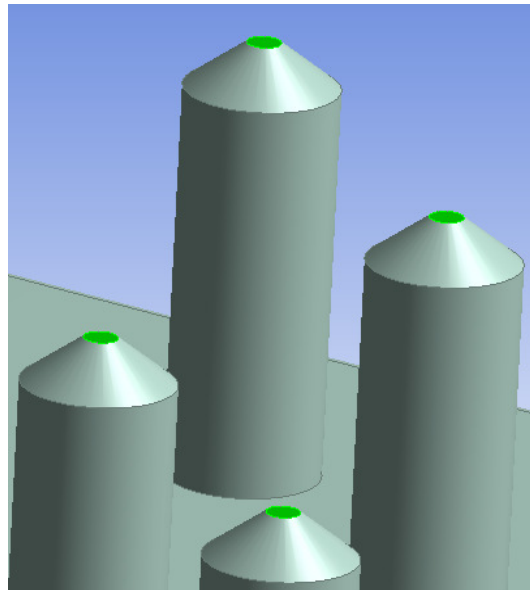


Fig. 116: Último paso para lograr la convergencia

Tras realizar todas estas tareas, se consigue alcanzar una solución que converge a la perfección tras 160 iteraciones como se puede observar en la siguiente Figura:

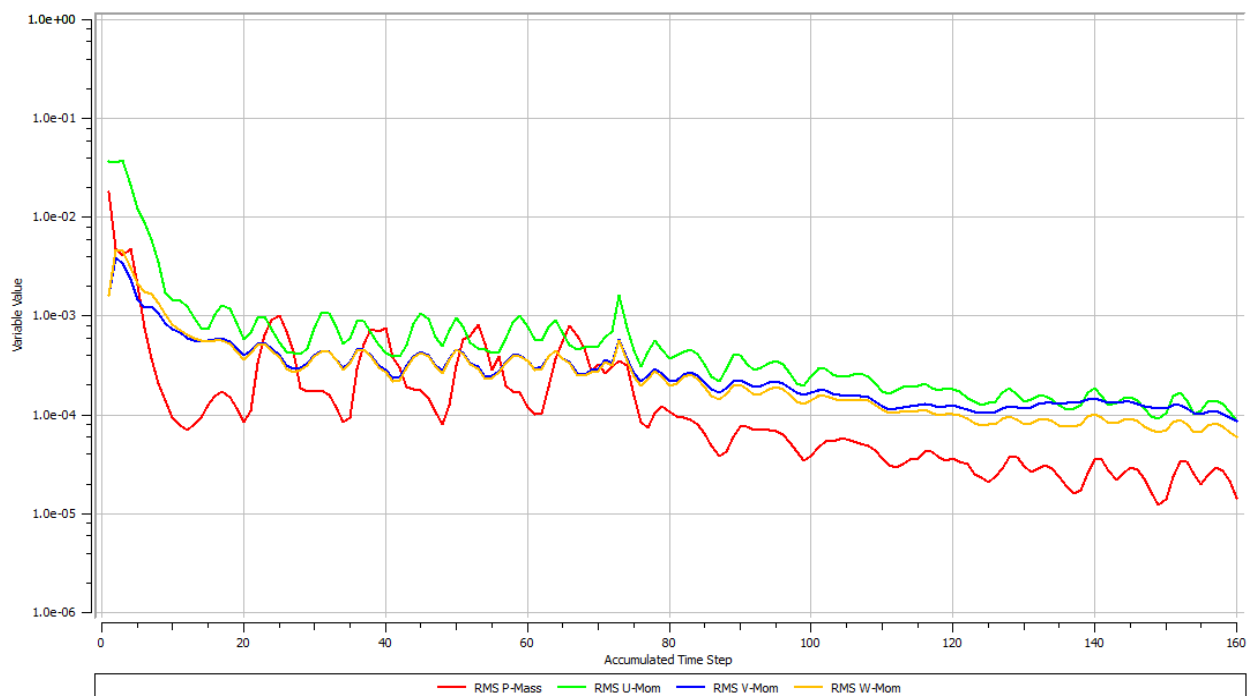


Fig. 117: Residuos vs iteraciones

Paso 5: Post-proceso

Una vez obtenida una solución que converge correctamente, el siguiente paso será trasladar los ficheros de resultados al módulo de post-procesado, el cual nos permitirá extraer la información que necesitemos en forma de diagramas, tablas y gráficos de todo tipo. Nótese que cuando en FEM se habla de “trasladar” los resultados se hace referencia al proceso de exportación-importación de los ficheros pertinentes de un módulo a otro que tradicionalmente era necesario realizar. ANSYS® Workbench, por el contrario, realizará este proceso automáticamente por nosotros.

El primer paso que se debe realizar llegado a este punto es la validación de los resultados ya que, al haber conseguido una convergencia completa (no por final de iteraciones), con toda seguridad el sistema se habrá resuelto correctamente para las condiciones de contorno y variables de entrada que se introdujeron en el Paso 3. Sin embargo, es posible que ocurra que parte de esta información se haya introducido de forma errónea, lo cual conducirá sin remedio a una solución incorrecta.

Para realizar este proceso, resultará conveniente generar diversos gráficos que representen determinadas variables clave del sistema (Figuras de 118 a 126):

- **Presión:** Cabe esperar una elevada presión debida a los múltiples estrechamientos y, principalmente al diminuto tamaño de las boquillas. Además, el valor de la presión debe ir en disminución desde la Entrada hasta las boquillas de salida puesto que, en un circuito hidráulico como este, la presión aparece como consecuencia a la carga que queda por vencer, por lo que a menor distancia y obturaciones entre cualquier punto y la salida, menor deberá ser la presión en dicho punto.

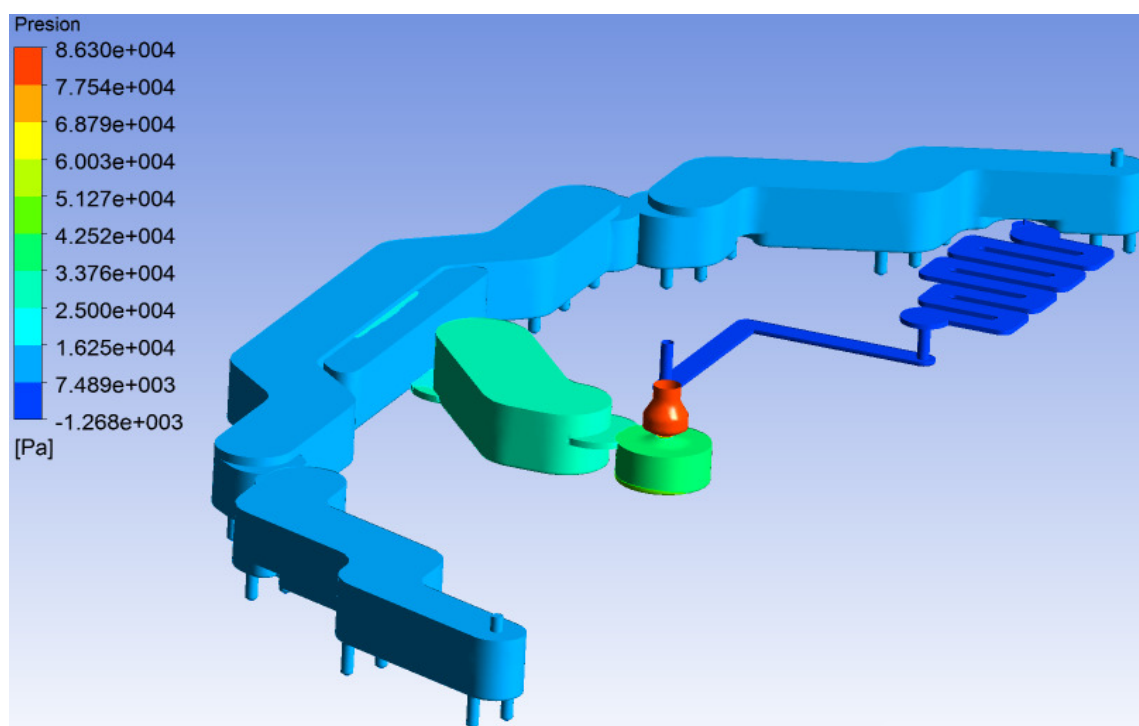


Fig. 118: Presión en la cara de entrada de fluido

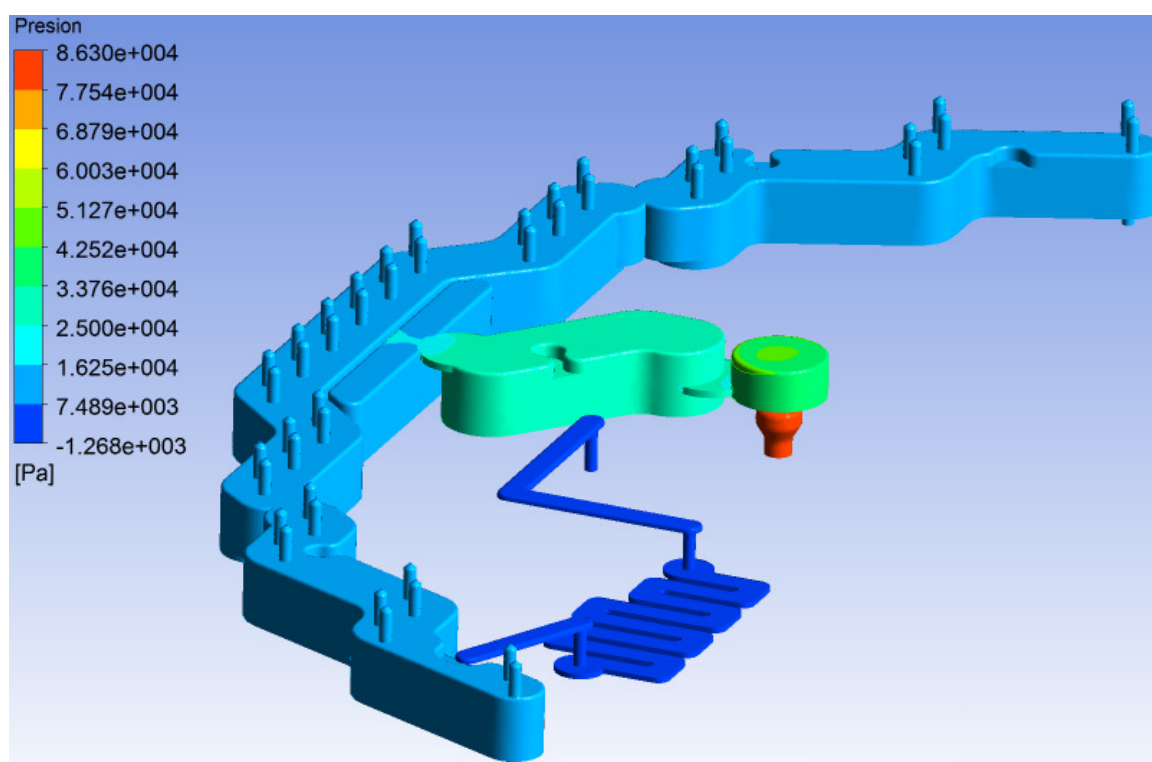


Fig. 119: Presión en la cara de salida de fluido

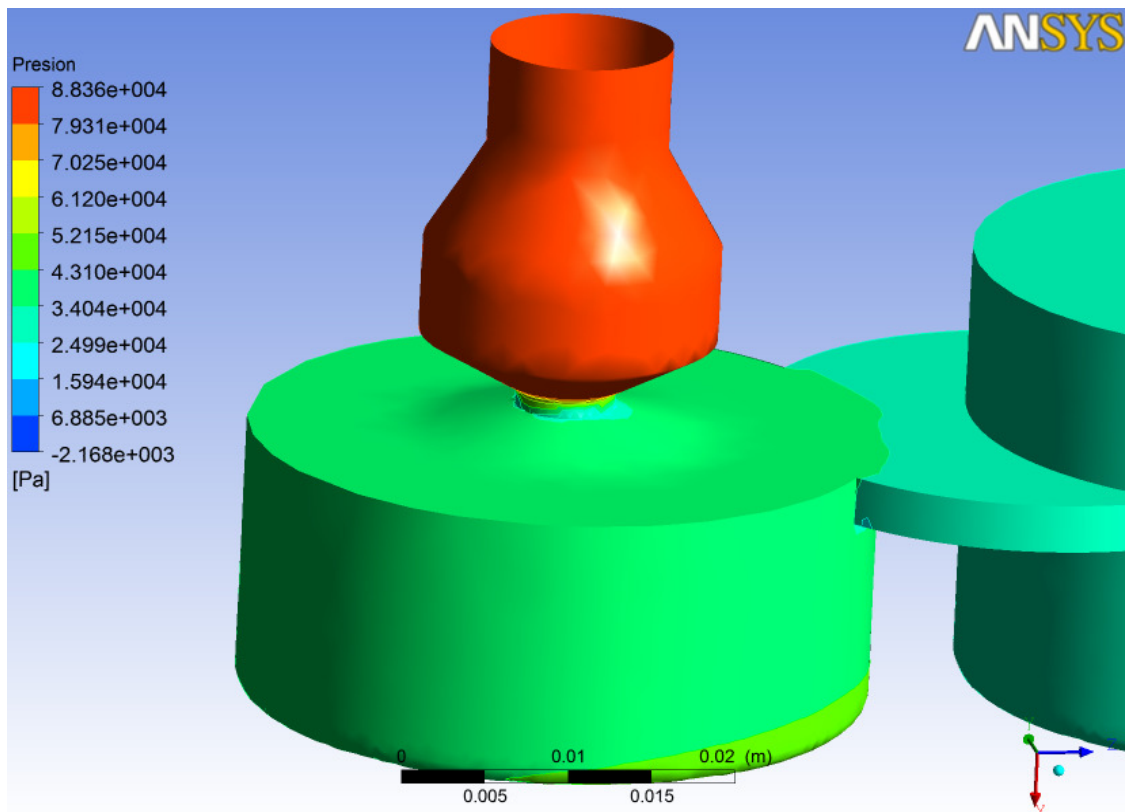


Fig. 120: Detalle de la presión en la Entrada

- Velocidad: Debe ser mayor en los estrechamientos si para un mismo caudal siempre que el fluido sea incompresible (como es nuestro caso).

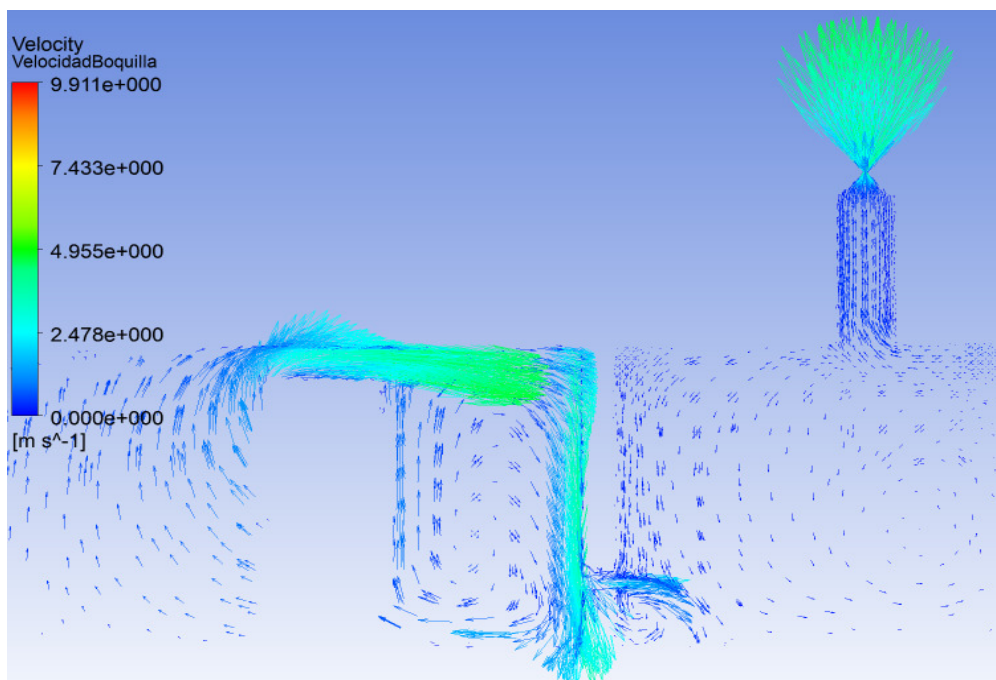


Fig. 121: Campo de velocidades en un corte transversal de una boquilla

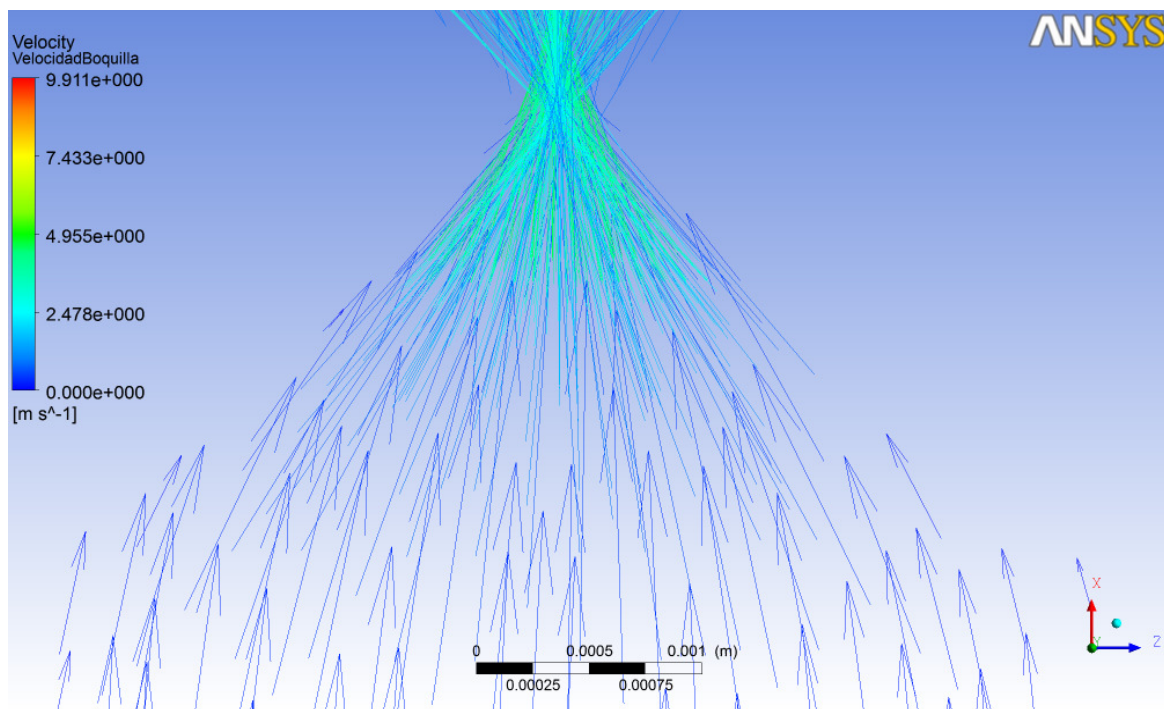


Fig. 122: Detalle del campo de velocidades en una boquilla

- Al mismo tiempo, el valor de la velocidad debe ser cero en toda la superficie que se encuentra en contacto con las paredes que delimitan el volumen de control:

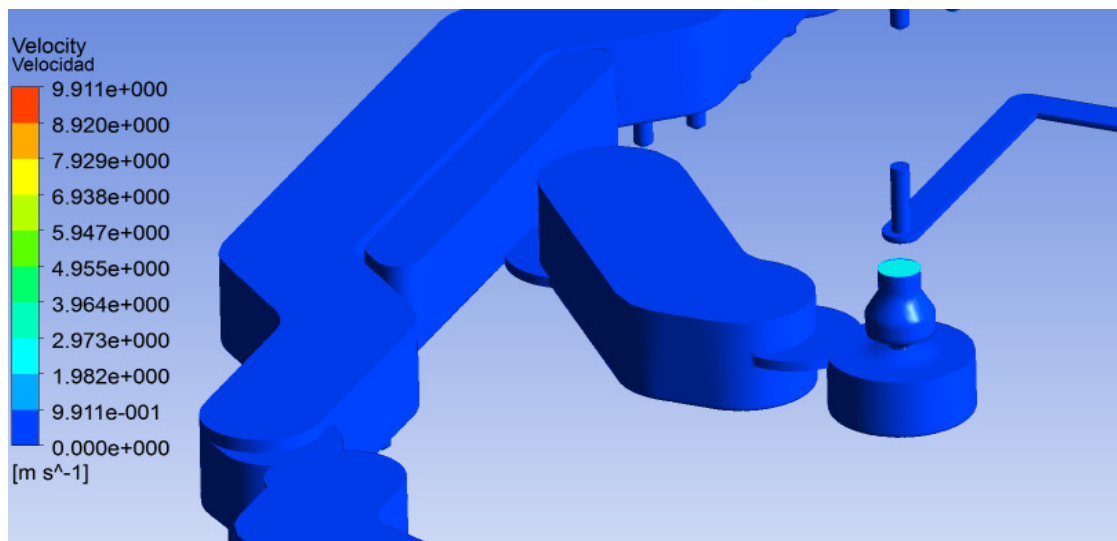


Fig. 123: Valor de la velocidad en el contorno que delimita al fluido próximo a la Entrada

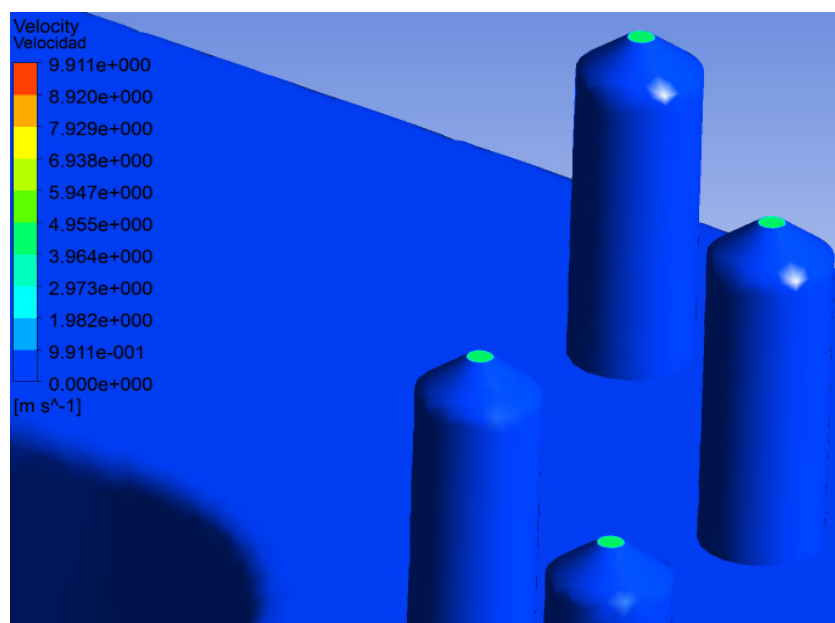


Fig. 124: Valor de la velocidad en el contorno que delimita al fluido próximo a las boquillas

- Líneas de corriente: Nos proporcionan una idea de la forma en que se distribuye el fluido a lo largo del circuito. Además, a igual caudal, mayor será la densidad de líneas cuanto menor sea la sección de paso y, por tanto, mayor será la velocidad:

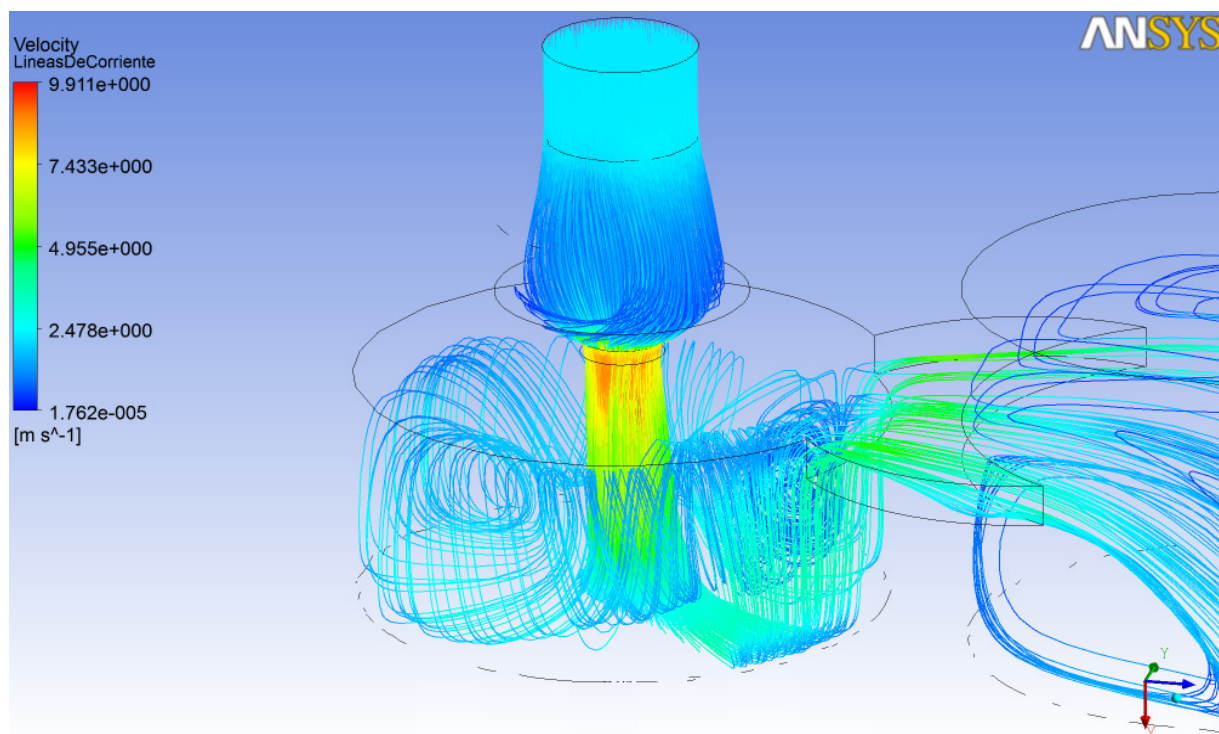


Fig. 125: Líneas de corriente en la zona de la entrada

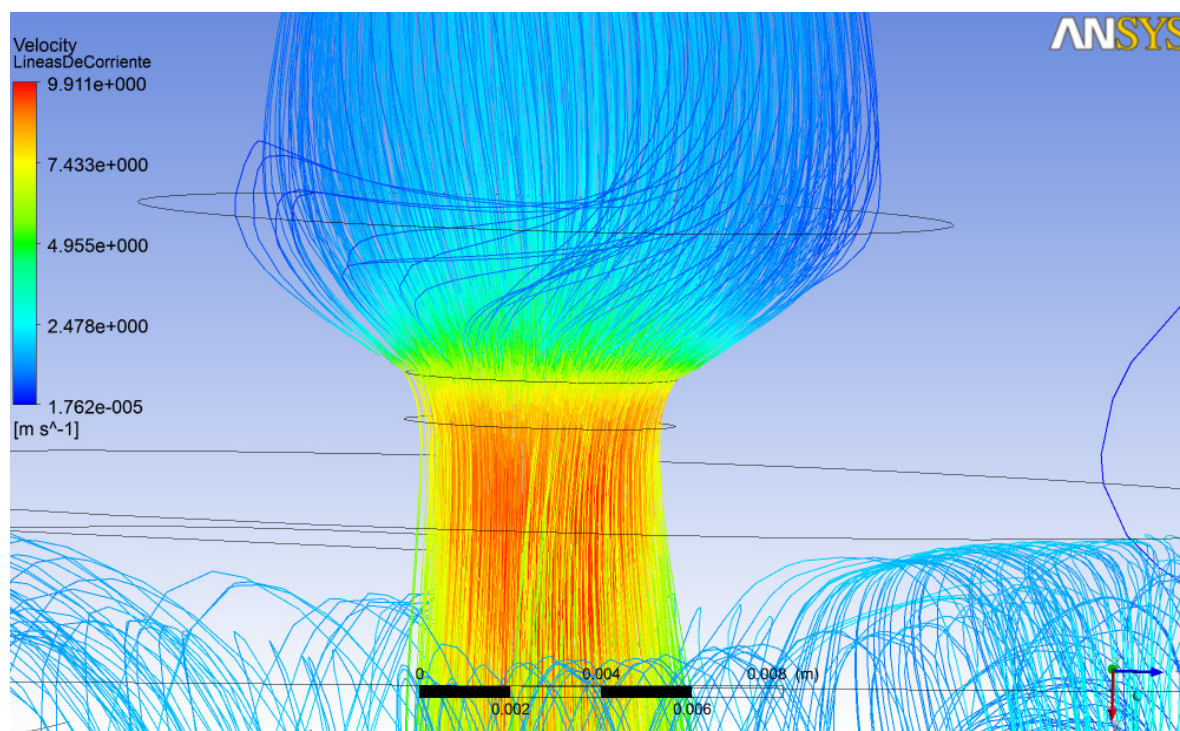


Fig. 126: Líneas de corriente en el cuello de la Entrada

Una vez terminada de analizar esta información según la cual, aparentemente los resultados son coherentes, resultará imprescindible extraer información cuantitativa acerca del caudal que escapa por cada una de las boquillas ya que es el objeto del análisis. Para ello se recurrirá al empleo de una hoja de cálculo que incorpora el propio módulo de resultados que, en un principio, puede resultar muy similar a otras hojas comerciales, sin embargo, esta posee la capacidad de interactuar directamente sobre el fichero de resultados que generó el módulo de resolución y manejar las variables físicas que este contiene por lo que podremos solicitar datos acerca de las mismas sobre elementos del sistema que previamente han sido nombrados. El código básico con el que esta herramienta trabaja es el siguiente:

=Función(Variable)@Lugar

Donde:

- ⤴ Función: Es el tratamiento que recibirá la información que contiene la variable.
- ⤴ Variable: Es la magnitud física sobre la que queremos obtener información.
- ⤴ Lugar: Es el nombre de la geometría (punto, línea, superficie o volumen) sobre la que queremos obtener la información a la que hace referencia la Variable.

Por lo tanto, las expresiones que se han empleado hasta llegar a calcular el porcentaje de caudal que abandona el sistema por la boquilla PL161 será:

- Velocidad: $\text{=ave(Velocity)@PL161}$
- Área: =area()@PL161
- Caudal másico: $\text{=ave(Velocity)@PL161*area()@PL161*1035.5}$
- Caudal másico[%]: $\text{=((ave(Velocity)@PL161*area()@PL161*1035.5)/(0.221))*100}$

Donde:

- 1035.5 es el valor de la densidad del fluido en Kg/m^3 .
- 0.221 es el valor del caudal másico total disponible para el sistema.
- “ave” es una función nativa de ANSYS® Workbench que permite calcular el valor promedio de una variable. El motivo del uso de esta función es obtener el valor de la velocidad equivalente en cualquier entrada o salida de fluido ya que, como sabemos por teoría, por efecto de la capa límite, ésta variará a lo largo de toda la superficie siendo cero en el punto externo de cualquier tubería y máximo en la zona central. Este gradiente se puede apreciar en nuestro modelo si acercamos lo suficiente la vista a una de las boquillas

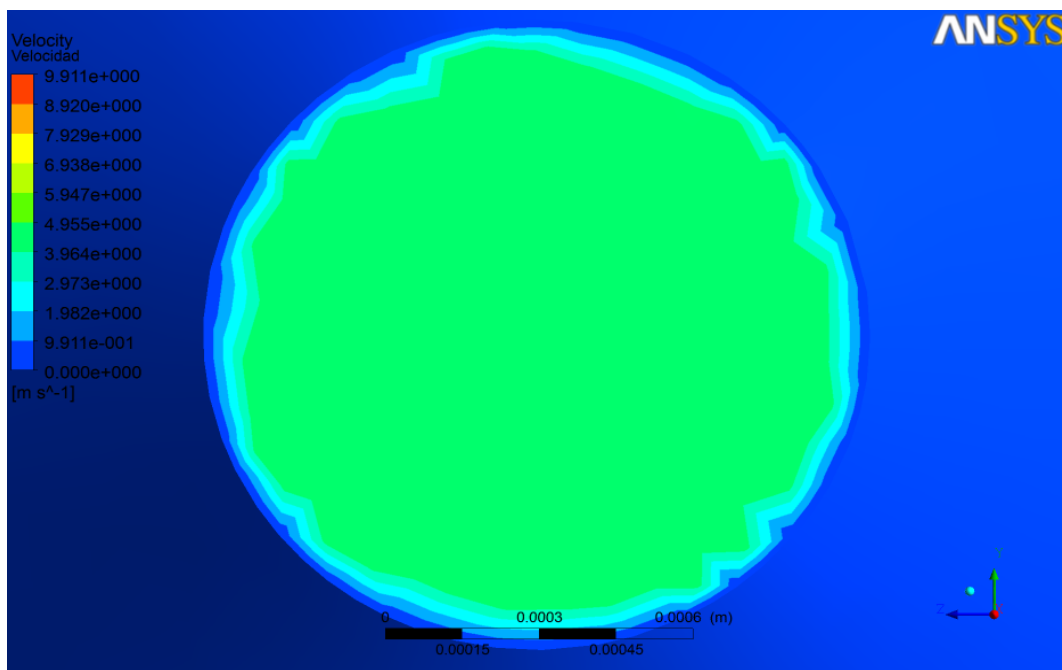


Fig. 127: Distribución de velocidades a lo largo de la superficie de una de las boquillas

- “**area**” es una función nativa de ANSYS® Workbench que permite calcular el área de una superficie. Nótese que también se podría haber introducido manualmente el valor del área correspondiente a cada una de las aperturas puesto que se trata de una variable de entrada al sistema, sin embargo, esto restaría precisión al análisis ya que, durante el proceso de mallado, la geometría sufre pequeñas distorsiones que influirán en el resultado proporcionado por CFX®.

De este modo, repitiendo el proceso para las 43 boquillas restantes y la IFFBFU podremos obtener el valor del porcentaje de caudal que escapa por cada una de las salidas que son objeto de diseño. Con estos 45 datos volveremos al Paso1, rellenaremos la columna correspondiente a la iteración en la que nos encontremos en la Tabla 14 y volveremos a comenzar el proceso hasta converger a una solución válida.

El flujograma que representa la actividad de este algoritmo es mostrado en la siguiente página:

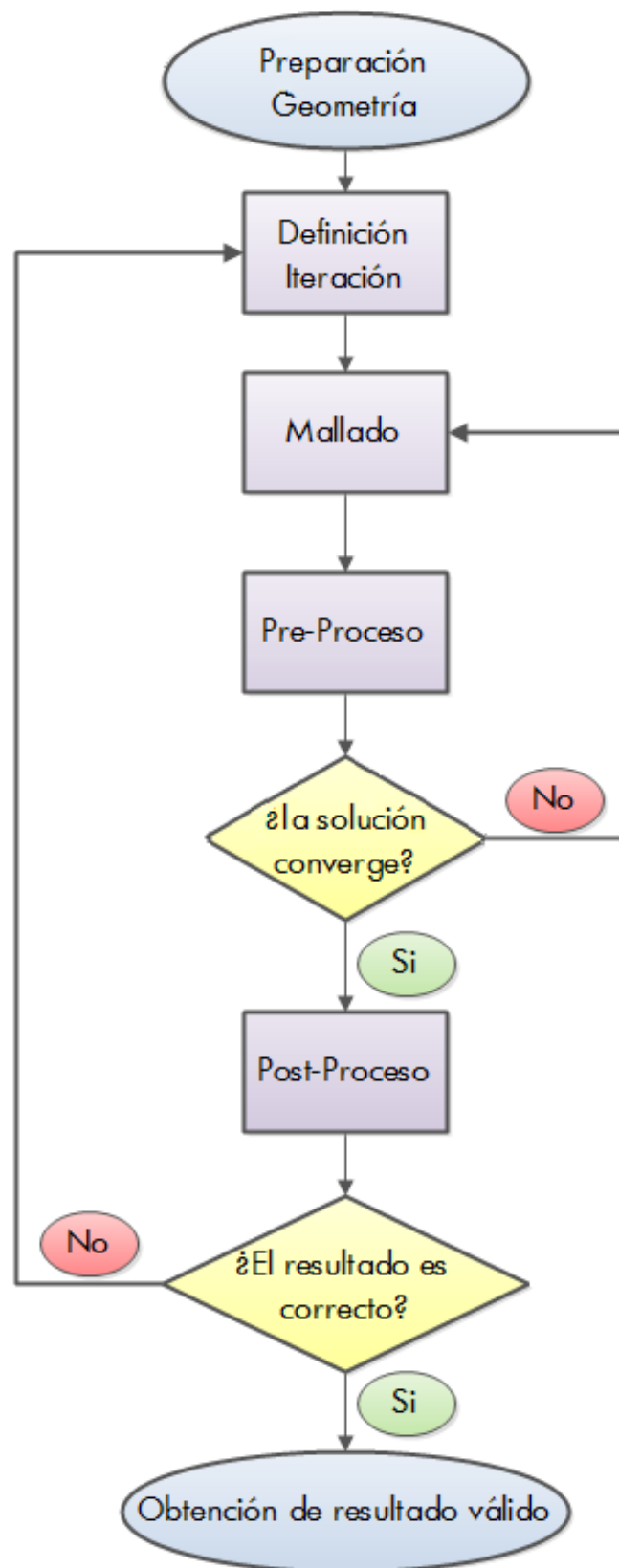


Fig. 128: Flujograma del algoritmo para el cálculo de los racores

Resultados de aplicar el algoritmo:

△ **ITERACIÓN 1:** Se trata de una iteración de control para verificar que:

1. El modelo funciona de forma cuantitativa. Se comprobará que el sumatorio caudal saliente se corresponde con el caudal que entra al sistema.
2. La hipótesis de que la posición de la boquilla no afecta a la cantidad de fluido que sale por ella, lo cual nos permitirá emplear una misma boquilla para todas las salidas que comparten el mismo número de TRM (y por tanto tendrán las mismas condiciones de contorno). Para poder verificar esta segunda hipótesis, será necesario no incluir la presión que genera la obturación correspondiente a atravesar los Plank, de forma que en este análisis, las salidas vierten a presión relativa cero.

Tabla 16: Primera iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 1 [mm]
16	1,5
24	1,5
32	1,5
36	1,5
40	1,5
Cilindro	5

Para estas variables y condiciones de contorno, se han obtenido los siguientes resultados:

Tabla 17: Resultados de la primera iteración. Al lado de cada solución, en color **verde**, se encuentra el % de caudal que debería salir por cada una de las boquillas

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	2,167	PL241	1,810	2,181	PL321	2,262	2,174	PL361	2,262	2,180	PL401	2,715	2,174
PL162	1,131	2,189	PL242	1,810	2,192	PL322	2,262	2,180	PL362	2,262	2,206	PL402	2,715	2,184
PL163	1,131	2,180	PL243	1,810	2,179	PL323	2,262	2,180	PL363	2,262	2,183	PL403	2,715	2,159
PL164	1,131	2,190	PL244	1,810	2,194	PL324	2,262	2,174	PL364	2,262	2,177	PL404	2,715	2,164
			PL245	1,810	2,177	PL325	2,262	2,194	PL365	2,262	2,168	PL405	2,715	2,138
			PL246	1,810	2,175	PL326	2,262	2,178	PL366	2,262	2,157	PL406	2,715	2,149
			PL247	1,810	2,181	PL327	2,262	2,180	PL367	2,262	2,174	PL407	2,715	2,165
			PL248	1,810	2,172	PL328	2,262	2,178	PL368	2,262	2,189	PL408	2,715	2,160
									PL369	2,262	2,187	PL409	2,715	2,172
									PL3610	2,262	2,171	PL4010	2,715	2,169
									PL3611	2,262	2,157	PL4011	2,715	2,178
									PL3612	2,262	2,177	PL4012	2,715	2,183
												IFFBFU	2,262	4,409

Como se puede observar en la tabla anterior, la cantidad de caudal que se obtiene para cada salida es prácticamente la misma, siendo necesario acudir al segundo decimal porcentual para apreciar la diferencia. Esta tendencia, únicamente se ve truncada en el caso de la IFFBFU puesto que se trata de la única salida con distinto diámetro. Esto nos permitirá dar por válida la segunda hipótesis planteada lo cual era previsible ya que, debido a la enorme sección transversal de paso de fluido que posee el Distribuidor en comparación con el área de salida de las boquillas, se conseguirá una velocidad de paso a través del mismo muy baja, lo que producirá una pérdida de presión a través del mismo igualmente baja, lo cual repercutirá en una presión de alimentación prácticamente idéntica para cada una de las salidas haciendo que el caudal que fluirá por cada una de ellas únicamente dependa de:

- El diámetro de la boquilla aguas abajo de la misma (a menor diámetro mayor menor caudal)
- La presión de descarga que suponga el Plank situado aguas abajo que alimenta la boquilla (a mayor presión menor caudal)
- El diámetro del resto de boquillas (a mayor diámetro del resto de boquillas menor caudal por la salida estudiada)

El hecho de que la segunda hipótesis sea cierta tendrá una enorme repercusión en el resto del análisis ya que supondrá que todas las boquillas que alimenten a un mismo Plank utilizarán

una misma boquilla, lo cual reducirá de 45 a 6 el número de variables a resolver por el algoritmo, lo cual reducirá drásticamente el número de iteraciones que será necesario realizar.

Además de la segunda hipótesis, resulta interesante hacer el sumatorio de los porcentaje que se han obtenido por cada salida, siendo este valor de 100,145%. Este error porcentual (obviamente debería sumar 100,000%) se debe a que la herramienta de post-proceso hace una integración del valor de la velocidad obtenido en cada una de las salidas tal y como se explicó en el Paso 5. El problema que surge es que no disponemos de un número excesivamente elevado de valores discretos de velocidad a lo largo de las superficies de integración, lo cual supondrá un error en el cálculo de la integral de superficie. No obstante, como se puede apreciar, el valor apenas difiere en 0,145%, lo cual supondrá un error más que razonable en el cálculo que se está realizando.

A modo de nota, es en este punto del proyecto cuando se aprecia el efecto de haber creado excepciones de mallado para todas las superficies que representan salidas del sistema, dando a todas ellas un tamaño de elemento mucho más pequeño que permita afinar mucho más en el cálculo de los caudales de salida.

- ⤴ **ITERACIÓN 2:** Una vez terminada la iteración anterior y hechas las comprobaciones pertinentes, pasaremos a realizar una segunda iteración que nos permita verificar que el modelo trabaja perfectamente.

Esta iteración se compondrá de los mismos parámetros de entrada que la anterior, a diferencia de que, esta vez sí se incluirán los valores de las presiones a vencer en cada una de las salidas a causa de los Plank que se encuentran conectados:

Tabla 18: Segunda iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 2 [mm]	ΔP Plank [Pa]
16	1,5	368
24	1,5	914
32	1,5	1470
36	1,5	1620
40	1,5	2180
Cilindro	5	2368

Para estas condiciones variables de entrada y condiciones de contorno, los resultados que se han obtenido son los presentados en la siguiente tabla:

Tabla 19: Resultados de la segunda iteración

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	2,395	PL241	1,810	2,301	PL321	2,262	2,176	PL361	2,262	2,150	PL401	2,715	2,016
PL162	1,131	2,419	PL242	1,810	2,313	PL322	2,262	2,182	PL362	2,262	2,175	PL402	2,715	2,025
PL163	1,131	2,410	PL243	1,810	2,298	PL323	2,262	2,182	PL363	2,262	2,153	PL403	2,715	2,000
PL164	1,131	2,421	PL244	1,810	2,314	PL324	2,262	2,175	PL364	2,262	2,147	PL404	2,715	2,007
			PL245	1,810	2,297	PL325	2,262	2,196	PL365	2,262	2,138	PL405	2,715	1,980
			PL246	1,810	2,294	PL326	2,262	2,180	PL366	2,262	2,127	PL406	2,715	1,991
			PL247	1,810	2,302	PL327	2,262	2,182	PL367	2,262	2,144	PL407	2,715	2,006
			PL248	1,810	2,291	PL328	2,262	2,180	PL368	2,262	2,158	PL408	2,715	2,002
									PL369	2,262	2,157	PL409	2,715	2,013
									PL3610	2,262	2,141	PL4010	2,715	2,012
									PL3611	2,262	2,126	PL4011	2,715	2,018
									PL3612	2,262	2,147	PL4012	2,715	2,026
												IFFBFU	2,262	4,978

Como se puede apreciar en la tabla de resultados anterior, la distribución de fluido se ha visto alterada con respecto a la anterior iteración de forma que, tal y como se explicó en el apartado 5.3 (modelado del problema), el sistema se comporta de forma contraria a como es deseado que lo hiciera, es decir, cuanto mayor sea el tamaño del Plank, será superior la cantidad

de refrigerante que este necesite y viceversa en el caso de los Plank menores. Sin embargo, tal y como se aprecia en la tabla anterior ha ocurrido la situación:

- ⤴ Los Plank de 16 TRM necesitan 1,131% del caudal cada uno y han pasado de tener una media de un 2,18% a disponer de una media de un 2,4% del caudal, por lo que se han alejado de su solución
- ⤴ Los Plank de 40 TRM necesitan un 2,715% del caudal cada uno y han pasado de tener una media de un 2,17% a disponer de una media del 2%, por lo que, de igual forma que ocurre con los Plank de 16 TRM, también éstos se alejan de su solución, solo que lo hacen en sentido contrario

Una vez analizados los resultados de esta segunda iteración, podemos concluir que:

- ⤴ El modelo trabaja como se esperaba que lo hiciera, quedando validado para el resto de iteraciones
 - ⤴ Será necesario realizar iteraciones en la forma que se describieron en los Pasos del 1 al 5 hasta converger a la solución final.
-
- ⤴ **ITERACIÓN 3:** Una vez sabemos que el modelo funciona como es debido, será necesario mantener todas las variables con la excepción de las 6 correspondientes a los diámetros de salida de fluido.

Como se puede observar en la tabla correspondiente a los resultados de la Iteración 2, el sistema se encuentra desbalanceado, de forma que los Plank más pequeños reciben un mayor caudal del que necesitan, por este motivo, para definir los parámetros de entrada a la siguiente iteración, todos los diámetros serán reducidos exceptuando los correspondientes a los Plank de 40 TRM.

La pregunta que inmediatamente surge llegados a este punto es: ¿Cómo hay que reducir los canales? Es interesante detenerse a contestar de la mejor manera posible esta pregunta ya que, como se ha explicado previamente, debido a la gran complejidad del modelo que se pretende resolver, cada una de las iteraciones conlleva una gran cantidad de tiempo, por lo que resultaría conveniente tratar de realizar este trabajo de manera eficiente, de forma que se requiera el menor número de iteraciones posible. Para ello se formulará la siguiente hipótesis: Supondremos que, cuando se alcance la solución final, la estructura de ésta será en forma escalonada, de forma que los Plank de 16 TRM tendrán una boquilla menor que los Plank de 24 TRM y que éstos últimos a su vez, tendrán una boquilla menor que los Plank de 32 TRM y así sucesivamente hasta llegar a los Plank portadores de 40 TRM. Por este motivo, esta iteración partirá de unos parámetros de entrada que cumplan con dicha hipótesis.

Además de reducir los diámetros de las boquillas y hacerlo en forma escalonada, como

hemos podido comprobar en la tabla de resultados correspondiente a la Iteración 2, el Cilindro que conecta con la parte del circuito que refriera las unidades IFF y BFU se encuentra sobredimensionado, provocando que a su través se escape más del doble del fluido necesario. Por este motivo, en esta iteración su diámetro se verá reducido aproximadamente en la misma proporción.

Tabla 20: Tercera iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 3 [mm]
16	0,8
24	1
32	1,2
36	1,2
40	1,5
Cilindro	2

Para las anteriores variables de entrada los resultados correspondientes a las 45 salidas son los siguientes:

Tabla 21: Resultados de la tercera iteración

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	0,826	PL241	1,810	1,462	PL321	2,262	2,126	PL361	2,262	2,113	PL401	2,715	3,303
PL162	1,131	0,848	PL242	1,810	1,432	PL322	2,262	2,127	PL362	2,262	2,114	PL402	2,715	3,314
PL163	1,131	0,826	PL243	1,810	1,433	PL323	2,262	2,108	PL363	2,262	2,097	PL403	2,715	3,318
PL164	1,131	0,834	PL244	1,810	1,442	PL324	2,262	2,126	PL364	2,262	2,102	PL404	2,715	3,308
			PL245	1,810	1,435	PL325	2,262	2,114	PL365	2,262	2,089	PL405	2,715	3,288
			PL246	1,810	1,455	PL326	2,262	2,123	PL366	2,262	2,097	PL406	2,715	3,296
			PL247	1,810	1,442	PL327	2,262	2,125	PL367	2,262	2,110	PL407	2,715	3,308
			PL248	1,810	1,441	PL328	2,262	2,143	PL368	2,262	2,126	PL408	2,715	3,310
									PL369	2,262	2,110	PL409	2,715	3,292
									PL3610	2,262	2,099	PL4010	2,715	3,322
									PL3611	2,262	2,084	PL4011	2,715	3,294
									PL3612	2,262	2,095	PL4012	2,715	3,312
												IFFBFU	2,262	4,075

▲ **ITERACIÓN 4:** Tras analizar en detalle los resultados correspondientes a la Iteración 3 encontramos los siguientes puntos a destacar para diseñar la siguiente iteración:

- Las salidas correspondientes a los Plank de 16 y 24 TRM han pasado de tener caudal en exceso a tenerlo en defecto, por lo que en el caso de que globalmente el resto de variables se compensen, será necesario aumentar el diámetro correspondiente a estas dos.
- Las salidas 32 y 36 se encuentra próximas a la solución por lo que si el resto de variables se compensan de cara la a siguiente iteración, será prudente no alterar estas dos salidas.
- Las salidas correspondientes a los Plank de 40 TRM han pasado de recibir menos caudal del necesario a recibir en exceso, pero no demasiado, por lo que se optará por reducir ligeramente su valor.
- La salida correspondiente al Cilindro ha disminuido el porcentaje de caudal que recibe pero no lo suficiente, por lo que será necesario disminuir nuevamente su valor.

A partir de esta información se plantea la cuarta iteración:

Tabla 22: Cuarta iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 4 [mm]
16	0,9
24	1,1
32	1,2
36	1,2
40	1,4
Cilindro	1

De acuerdo con estas variables de entrada, los resultados que se han obtenido para las 45 salidas del sistema son:

Tabla 23: Resultados de la cuarta iteración

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	1,238	PL241	1,810	1,870	PL321	2,262	2,215	PL361	2,262	2,199	PL401	2,715	2,986
PL162	1,131	1,231	PL242	1,810	1,872	PL322	2,262	2,204	PL362	2,262	2,197	PL402	2,715	3,000
PL163	1,131	1,245	PL243	1,810	1,866	PL323	2,262	2,205	PL363	2,262	2,189	PL403	2,715	2,986
PL164	1,131	1,229	PL244	1,810	1,878	PL324	2,262	2,221	PL364	2,262	2,202	PL404	2,715	2,980
			PL245	1,810	1,871	PL325	2,262	2,217	PL365	2,262	2,177	PL405	2,715	2,963
			PL246	1,810	1,873	PL326	2,262	2,216	PL366	2,262	2,182	PL406	2,715	2,985
			PL247	1,810	1,867	PL327	2,262	2,193	PL367	2,262	2,202	PL407	2,715	2,991
			PL248	1,810	1,870	PL328	2,262	2,221	PL368	2,262	2,196	PL408	2,715	2,970
									PL369	2,262	2,200	PL409	2,715	2,983
									PL3610	2,262	2,186	PL4010	2,715	3,000
									PL3611	2,262	2,180	PL4011	2,715	2,985
									PL3612	2,262	2,190	PL4012	2,715	2,989
												IFFBFU	2,262	1,182

▲ **ITERACIÓN 5:** Tras analizar en detalle los resultados correspondientes a la Iteración 4 encontramos los siguientes puntos a destacar para diseñar la siguiente iteración:

- Los Plank de 16, 24, 32 y 36 TRM reciben un caudal muy próximo a la solución final.
- Los Plank de 40 TRM reciben un ligero exceso de caudal por lo que resultará conveniente reducir una décima de milímetro su diámetro.
- La IFFBFU ha pasado de recibir casi el doble de caudal a disponer de la mitad del necesario por lo que esta nueva reducción de sección ha sido excesiva, de forma que se iterará en el punto intermedio de las dos iteraciones anteriores.

A partir de esta información se plantea la quinta iteración:

Tabla 24: Quinta iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 5 [mm]
16	0,9
24	1,1
32	1,2
36	1,2
40	1,3
Cilindro	1,5

De acuerdo con estas variables de entrada, los resultados que se han obtenido para las 45 salidas del sistema son:

Tabla 25: Resultados de la quinta iteración

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	1,287	PL241	1,810	1,947	PL321	2,262	2,300	PL361	2,262	2,285	PL401	2,715	2,627
PL162	1,131	1,287	PL242	1,810	1,946	PL322	2,262	2,298	PL362	2,262	2,289	PL402	2,715	2,633
PL163	1,131	1,291	PL243	1,810	1,950	PL323	2,262	2,294	PL363	2,262	2,277	PL403	2,715	2,622
PL164	1,131	1,283	PL244	1,810	1,949	PL324	2,262	2,296	PL364	2,262	2,276	PL404	2,715	2,620
			PL245	1,810	1,951	PL325	2,262	2,301	PL365	2,262	2,266	PL405	2,715	2,619
			PL246	1,810	1,950	PL326	2,262	2,298	PL366	2,262	2,267	PL406	2,715	2,633
			PL247	1,810	1,948	PL327	2,262	2,296	PL367	2,262	2,285	PL407	2,715	2,628
			PL248	1,810	1,946	PL328	2,262	2,294	PL368	2,262	2,280	PL408	2,715	2,620
									PL369	2,262	2,282	PL409	2,715	2,628
									PL3610	2,262	2,272	PL4010	2,715	2,633
									PL3611	2,262	2,261	PL4011	2,715	2,620
									PL3612	2,262	2,267	PL4012	2,715	2,632
												IFFBFU	2,262	2,885

⤴ **ITERACIÓN 6:** Tras analizar en detalle los resultados correspondientes a la Iteración 5 encontramos los siguientes puntos a destacar para diseñar la siguiente iteración:

- Todas las salidas correspondientes a los Plank reciben un caudal muy próximo al deseado por lo que no resultará recomendable modificar su geometría.
- Se ha conseguido que la salida IFFBFU tenga un mejor ajuste correspondiente al punto intermedio de las dos iteraciones anteriores. Sin embargo, aun presenta una desviación de caudal por exceso que trataremos de corregir reduciendo el diámetro del Cilindro en una décima de milímetro.

Tabla 26: Sexta iteración

Plank [Nº de TRMs]	Iteración 6 [mm]
16	0,9
24	1,1
32	1,2
36	1,2
40	1,3
Cilindro	1,4

De acuerdo con estas variables de entrada, los resultados que se han obtenido para las 45 salidas del sistema son:

Tabla 27: Resultados de la sexta iteración

Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real	Salida	% Teor.	% Real
PL161	1,131	1,295	PL241	1,810	1,954	PL321	2,262	2,307	PL361	2,262	2,291	PL401	2,715	2,637
PL162	1,131	1,298	PL242	1,810	1,954	PL322	2,262	2,304	PL362	2,262	2,292	PL402	2,715	2,643
PL163	1,131	1,301	PL243	1,810	1,957	PL323	2,262	2,309	PL363	2,262	2,282	PL403	2,715	2,638
PL164	1,131	1,294	PL244	1,810	1,949	PL324	2,262	2,308	PL364	2,262	2,285	PL404	2,715	2,642
			PL245	1,810	1,879	PL325	2,262	2,309	PL365	2,262	2,282	PL405	2,715	2,631
			PL246	1,810	1,958	PL326	2,262	2,307	PL366	2,262	2,273	PL406	2,715	2,644
			PL247	1,810	1,956	PL327	2,262	2,307	PL367	2,262	2,296	PL407	2,715	2,643
			PL248	1,810	1,958	PL328	2,262	2,308	PL368	2,262	2,288	PL408	2,715	2,636
									PL369	2,262	2,285	PL409	2,715	2,642
									PL3610	2,262	2,284	PL4010	2,715	2,646
									PL3611	2,262	2,272	PL4011	2,715	2,634
									PL3612	2,262	2,283	PL4012	2,715	2,639
												IFFBFU	2,262	2,488

Tras analizar los resultados correspondientes a la sexta iteración, podemos comprobar como el caudal correspondiente a la salida IFFBFU a descendido entrando dentro del rango admisible del 15% de error tal y como se puede observar en la Tabla 29. Además, en las tablas 28 y 30 se ha resumido las características de las 6 iteraciones realizadas así como de los resultados obtenidos para todas ellas respectivamente.

Tabla 28: Resumen de iteraciones

Plank [Nº de TRMs]	IT1 [mm]	IT2 [mm]	IT3 [mm]	IT4 [mm]	IT5 [mm]	IT6 [mm]
16	1,5	1,5	0,8	0,9	0,9	0,9
24	1,5	1,5	1	1,1	1,1	1,1
32	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2
36	1,5	1,5	1,2	1,2	1,2	1,2
40	1,5	1,5	1,5	1,4	1,3	1,3
Cilindro	5	5	2	1	1,5	1,4

Por lo tanto, podemos concluir este apartado diciendo que tras 6 iteraciones se ha conseguido alcanzar el objetivo de calcular los diámetros de los racores que conectan los 44 Plank que componen la antena, además del espesor del conducto de conexión con la rama de alimentación de fluido al canal de las unidades IFF y BFU

Tabla 29: Error cometido por Plank y por iteración

Plank	Error It1%	Error It2%	Error It3%	Error It4%	Error It5%	Error It6%
PL161	67,3	84,9	36,2	4,4	0,6	12,7
PL162	68,6	86,4	34,6	5,2	0,8	12,9
PL163	67,6	85,2	36,5	4,3	0,8	13,1
PL164	69,2	87,1	35,5	5,0	0,9	12,6
PL241	11,6	17,8	25,2	4,3	0,4	7,4
PL242	12,2	18,4	26,7	4,2	0,4	7,4
PL243	11,3	17,4	26,8	4,6	0,4	7,5
PL244	12,6	18,7	26,0	3,6	0,0	7,1
PL245	15,9	22,2	23,6	0,4	3,8	3,7
PL246	11,1	17,2	25,7	4,3	0,4	7,6
PL247	11,5	17,7	26,3	4,6	0,4	7,5
PL248	10,9	17,0	26,4	4,5	0,6	7,6
PL321	5,8	5,7	7,8	4,0	0,3	2,0
PL322	5,4	5,3	7,7	4,3	0,3	1,8
PL323	5,6	5,5	8,7	4,5	0,6	2,0
PL324	5,8	5,8	7,9	3,8	0,5	2,0
PL325	5,0	4,9	8,4	4,0	0,3	2,0
PL326	5,6	5,5	8,0	3,9	0,4	2,0
PL327	5,5	5,4	7,9	4,9	0,5	2,0
PL328	5,6	5,5	7,1	3,8	0,6	2,0
PL361	4,8	6,2	7,8	4,0	0,3	1,3
PL362	3,8	5,1	7,8	4,1	0,1	1,3
PL363	4,3	5,7	8,1	4,1	0,2	0,9
PL364	4,7	6,0	8,0	3,6	0,4	1,0
PL365	5,0	6,3	8,5	4,6	0,7	0,9
PL366	5,1	6,4	7,7	4,0	0,3	0,5
PL367	5,3	6,6	8,1	4,1	0,5	1,5
PL368	4,3	5,7	7,1	4,0	0,3	1,1
PL369	4,3	5,6	7,7	3,7	0,1	1,0
PL3610	4,9	6,3	8,1	4,3	0,5	1,0
PL3611	5,1	6,4	8,3	4,0	0,5	0,4
PL3612	4,6	6,0	8,2	4,1	0,7	0,9
PL401	17,6	23,5	25,3	13,2	0,4	3,0
PL402	17,4	23,4	25,4	13,5	0,4	2,7
PL403	18,2	24,2	25,8	13,2	0,6	2,9
PL404	18,1	24,0	25,2	12,8	0,8	2,8
PL405	18,7	24,7	25,0	12,6	0,5	3,2
PL406	18,7	24,7	24,7	12,9	0,4	2,7
PL407	18,1	24,1	25,2	13,2	0,6	2,7
PL408	18,1	24,1	25,6	12,7	0,6	3,0
PL409	17,8	23,8	24,6	12,9	0,5	2,8
PL4010	18,0	24,0	25,5	13,4	0,5	2,6
PL4011	17,3	23,4	25,1	13,3	0,5	3,1
PL4012	17,3	23,2	25,5	13,3	0,3	2,9
IFFBFU	77,2	100,1	63,8	52,5	16,0	9,1

Tabla 30: Resumen de resultados de las iteraciones

Plank	Teórico [%]	Iteración1 [%]	Iteración2 [%]	Iteración3 [%]	Iteración4[%]	Iteración5 [%]	Iteración6 [%]
PL161	1,131	2,167	2,395	0,826	1,238	1,287	1,295
PL162	1,131	2,189	2,419	0,848	1,231	1,287	1,298
PL163	1,131	2,180	2,410	0,826	1,245	1,291	1,301
PL164	1,131	2,190	2,421	0,834	1,229	1,283	1,294
PL241	1,810	2,181	2,301	1,462	1,870	1,947	1,954
PL242	1,810	2,192	2,313	1,432	1,872	1,946	1,954
PL243	1,810	2,179	2,298	1,433	1,866	1,950	1,957
PL244	1,810	2,194	2,314	1,442	1,878	1,949	1,949
PL245	1,810	2,177	2,297	1,435	1,871	1,951	1,879
PL246	1,810	2,175	2,294	1,455	1,873	1,950	1,958
PL247	1,810	2,181	2,302	1,442	1,867	1,948	1,956
PL248	1,810	2,172	2,291	1,441	1,870	1,946	1,958
PL321	2,262	2,174	2,176	2,126	2,215	2,300	2,307
PL322	2,262	2,180	2,182	2,127	2,204	2,298	2,304
PL323	2,262	2,180	2,182	2,108	2,205	2,294	2,309
PL324	2,262	2,174	2,175	2,126	2,221	2,296	2,308
PL325	2,262	2,194	2,196	2,114	2,217	2,301	2,309
PL326	2,262	2,178	2,180	2,123	2,216	2,298	2,307
PL327	2,262	2,180	2,182	2,125	2,193	2,296	2,307
PL328	2,262	2,178	2,180	2,143	2,221	2,294	2,308
PL361	2,262	2,180	2,150	2,113	2,199	2,285	2,291
PL362	2,262	2,206	2,175	2,114	2,197	2,289	2,292
PL363	2,262	2,183	2,153	2,097	2,189	2,277	2,282
PL364	2,262	2,177	2,147	2,102	2,202	2,276	2,285
PL365	2,262	2,168	2,138	2,089	2,177	2,266	2,282
PL366	2,262	2,157	2,127	2,097	2,182	2,267	2,273
PL367	2,262	2,174	2,144	2,110	2,202	2,285	2,296
PL368	2,262	2,189	2,158	2,126	2,196	2,280	2,288
PL369	2,262	2,187	2,157	2,110	2,200	2,282	2,285
PL3610	2,262	2,171	2,141	2,099	2,186	2,272	2,284
PL3611	2,262	2,157	2,126	2,084	2,180	2,261	2,272
PL3612	2,262	2,177	2,147	2,095	2,190	2,267	2,283
PL401	2,715	2,174	2,016	3,303	2,986	2,627	2,637
PL402	2,715	2,184	2,025	3,314	3,000	2,633	2,643
PL403	2,715	2,159	2,000	3,318	2,986	2,622	2,638
PL404	2,715	2,164	2,007	3,308	2,980	2,620	2,642
PL405	2,715	2,138	1,980	3,288	2,963	2,619	2,631
PL406	2,715	2,149	1,991	3,296	2,985	2,633	2,644
PL407	2,715	2,165	2,006	3,308	2,991	2,628	2,643
PL408	2,715	2,160	2,002	3,310	2,970	2,620	2,636
PL409	2,715	2,172	2,013	3,292	2,983	2,628	2,642
PL4010	2,715	2,169	2,012	3,322	3,000	2,633	2,646
PL4011	2,715	2,178	2,018	3,294	2,985	2,620	2,634
PL4012	2,715	2,183	2,026	3,312	2,989	2,632	2,639
IFFBFU	2,262	4,409	4,978	4,075	1,182	2,885	2,488
Sumatorio	100,000	100,145	100,345	100,844	100,902	100,819	100,788



6. Conclusiones

El objetivo principal del proyecto se ha completado con éxito: se ha diseñado una solución válida y optimizada, según especificaciones, para el circuito de refrigeración de los 44 Plank (con diferente número de TRM) de una antena de uso aeronáutico. El diseño final elegido ha sido el de **“5 Canales Recortados”** (Figura 129).

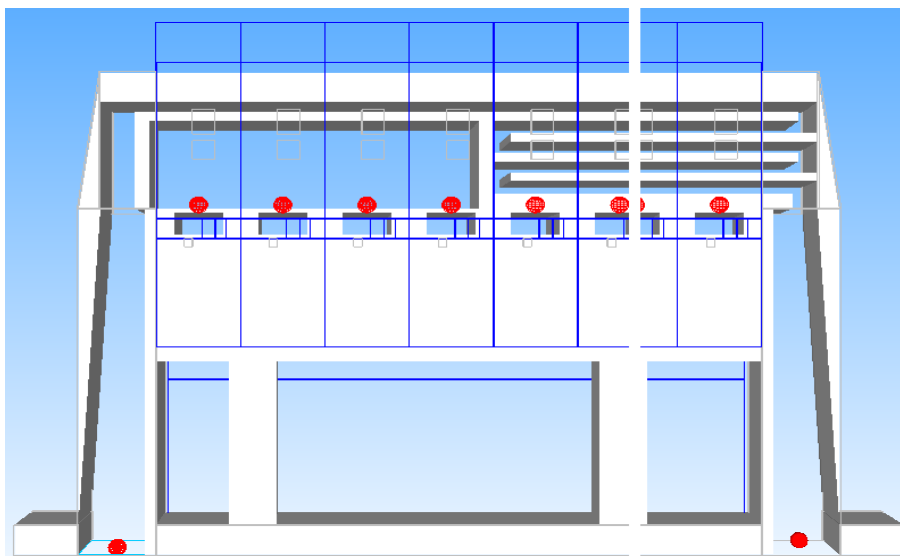


Fig. 129, Diseño final: “5 Canales Recortados”

Además, el cumplimiento del objetivo principal ha llevado consigo la consecución de los siguientes hitos secundarios:

- ⤴ Se propone una solución óptima con un diseño unificado para los 5 modelos de Plank.
- ⤴ Se ha conseguido que la solución final propuesta parta de un mismo espesor para todos sus canales.
- ⤴ Se ha logrado que la solución escogida cumpla con el mínimo de los 2 mm. de espesor de pared para favorecer el proceso de pegado de las tapas mediante la tecnología “Brazing”, como requerían las especificaciones.
- ⤴ Validación del modelo construido en Flotherm para el diseño y cálculo de los Plank, siendo los errores medios obtenidos en la temperatura de salida del fluido con respecto a la calculada teóricamente en torno al 0,5 %, estando el error máximo entorno al 2 % .
- ⤴ Se ha calculado el diámetro de los racores de conexión de los 44 Plank, en sus diferentes distribuciones, al Distribuidor-Colector.
- ⤴ Se ha conseguido una solución donde se emplean únicamente 5 modelos de racores diferentes para adaptar los 44 Plank, uno por cada grupo de ellos. siendo estos los que se muestran en la tabla 31.

Tabla 31: Diámetro de los racores

Plank [Nº de TRMs]	IT6 [mm]
16	0,9
24	1,1
32	1,2
36	1,2
40	1,3

- ⤴ Se ha calculado el diámetro del racor que conecta el Distribuidor con el circuito de refrigeración de las unidades IFF y BFU, siendo este de 1.4 mm.

Finalmente, como resumen, expresar que *en el presente trabajo se presenta un diseño optimizado (con FEM) de un circuito de refrigeración de una red de tarjetas electrónicas pertenecientes a una antena, sujeto a unas especificaciones muy severas, como son las del sector aeronáutico. La solución propuesta es viable y será implementada en un avión de combate.*

Bibliografía

1. *Jiyuan, Tu*. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. Editorial Butterworth-Heinemann. 1ª edición. 480 páginas. Burlington, USA. 9 de Noviembre de 2007. ISBN: 9780750685634
2. *Lawrence, K*. ANSYS Workbench Tutorial Release 12. Editorial SDC Publications. 1ª edición. 252 páginas. Universidad de Texas, Arlington, USA. 9 de Septiembre de 2010. ISBN: 9781585035809.
3. *Nakasone, Y*. Engineering Analysis with Ansys Software. Editorial Butterworth-Heinemann. 1º edición. 456 Páginas. Oxford, UK. 2006. ISBN: 075066875X.
4. *Moaveni, Saeed*. Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS. Editorial Prentice Hall. 1ª edición. 272 Páginas. Nueva Jersey, USA. 1999. ISBN: 0137850980.
5. *Steinberg, Dave S*. Cooling Techniques for Electronic Equipment. Editorial Wiley-Interscience. 2º edición. 475 Páginas. Nueva York, USA. 1991. ISBN: 0471524514.
6. *Anderson, John*. Computational Fluids Dynamics. Editorial Mc Graw Hill. 1º edición. 543 Páginas. Maryland, USA. 1995. ISBN: 0070016852.
7. *Versteeg, H. y Malalasekera, W*. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Editorial Pearson. 2ª edición. 520 Páginas. 16 de Febrero de 2007. ISBN: 0131274988
8. *Holman, J*. Heat Transfer. Editorial Mc Graw Hill. 10ª Edición. 736 Páginas. Mayo del 2009. ISBN: 9780071267694.
9. *Reddy, J. N*. An Introduction to the Finite Element Method. Editorial McGraw-Hill. 3ª Edición. 424 Páginas. 11 de Enero del 2005. ISBN: 0072466855.

10. Catalogo de documentación sobre elementos finitos y el software informático Ansys:
<http://www.ansys.com/Support/Documentation>

Último acceso: 20-2-2011

11. Tutorial de mallado en CFX para la versión de Workbench 11.0:
<http://seam.ustb.edu.cn/UploadFile/20080512040742250.pdf>

Último acceso: 4-02-2011

12. Tutorial y ejemplos del software informático Flotherm:
<http://www.engr.sjsu.edu/ndejong/ME%20146%20files/FLOTHERM%20tutorial.doc>

Último acceso: 11-01-2011

13. Tutoriales y ejemplos prácticos del software informático CFX:
<http://iceberg2.shef.ac.uk/docs/cfx-pdf/tutorials/>

Último acceso: 28-01-2011

14. Novedades ANSYS v13.0
<http://www.ansys.com/Products/ANSYS+13.0+Release+Highlights>

Último acceso: 2-4-2011

Presupuesto

En este apartado, se van a analizar los costes que ha generado la elaboración del proyecto, teniendo en cuenta el coste de personal, así como de licencias de programas informáticos, equipos y material.

Coste de personal

Uno de los costes más relevantes para el presupuesto del proyecto es el importe imputable al personal. Debemos calcular el coste total de personal, en función de las horas que ha dedicado al presente proyecto.

En este caso, la elaboración del proyecto ha requerido en total tres meses. Teniendo en cuenta que la jornada laboral es de ocho horas, los datos referentes al número de horas trabajadas son los siguientes:

- Tiempo de desarrollo del proyecto: 3 meses
- Días laborables/mes: 22
- Horas laborables/día: 8
- Total horas empleadas en el proyecto: 528

Para el cálculo del coste de personal, tenemos que partir de la titulación de los trabajadores y su experiencia. En este caso, el personal encargado del proyecto es un Ingeniero Industrial Mecánico, con una experiencia laboral relacionada con el proyecto de dos años aproximadamente, y un delineante con categoría Experto.

En función de los datos anteriores y sabiendo que el salario medio mensual de un Ingeniero Industrial Mecánico con esta experiencia está en torno a 2694.39€, y el de un delineante es 1954.56€, podemos calcular el coste asociado a los recursos como se resume en la Tabla 32:

Tabla 32: Coste de personal

Cualificación Profesional	Categoría	Dedicación [meses]	Coste hombre [€/mes]	Coste [€]
Ingeniero Industrial	Ingeniero Junior	3	2.694,39	8.083,17
Delineante	Experto	1	1.954,56	1.954,56
			Total	10.037,73

Coste de licencias y equipos informáticos

Para el desarrollo de este proyecto se han utilizado los siguientes programas informáticos:

- ANSYS v13.0
- Flotherm v7.1
- Suite ofimática - LibreOffice

En este apartado, los mayores costes son los generados por el uso del software profesional de análisis Flotherm[®] y ANSYS[®]. Para el cálculo de los costes de ambos, vamos a suponer que no se posee el software sino que se ha alquilado la licencia. Tenemos que tener en cuenta que, a pesar de que el proyecto se ha desarrollado durante tres meses, las licencias se alquilan durante un año completo.

Además, debemos incluir el coste generado por los equipos informáticos y el material de oficina. En total, se han usado dos equipos informáticos, uno de ellos portátil. Por lo que los costes correspondientes a licencias y equipos son los siguientes:

Tabla 33: Coste de licencias y equipos

Descripción	Coste [€]	% Uso dedicado proyecto	Dedicación [meses]	Periodo de depreciación [meses]	Coste imputable [€]
Alquiler licencia ANSYS	41.710,00	50	3	12	5.213,75
Alquiler licencia FLOTHERM	30.000,00	50	3	12	3.750,00
Equipo informático	5.000,00	100	3	36	416,67
Equipo informático portátil	1.000,00	100	3	36	83,33
Material de oficina	600,00	10	3	12	15,00
Impresora	700,00	5	3	24	4,38
				Total	9.463,75

Tanto el procesador de textos como la hoja de cálculo usadas pertenecen al paquete ofimático LibreOffice, que es libre uso y sin coste alguno.

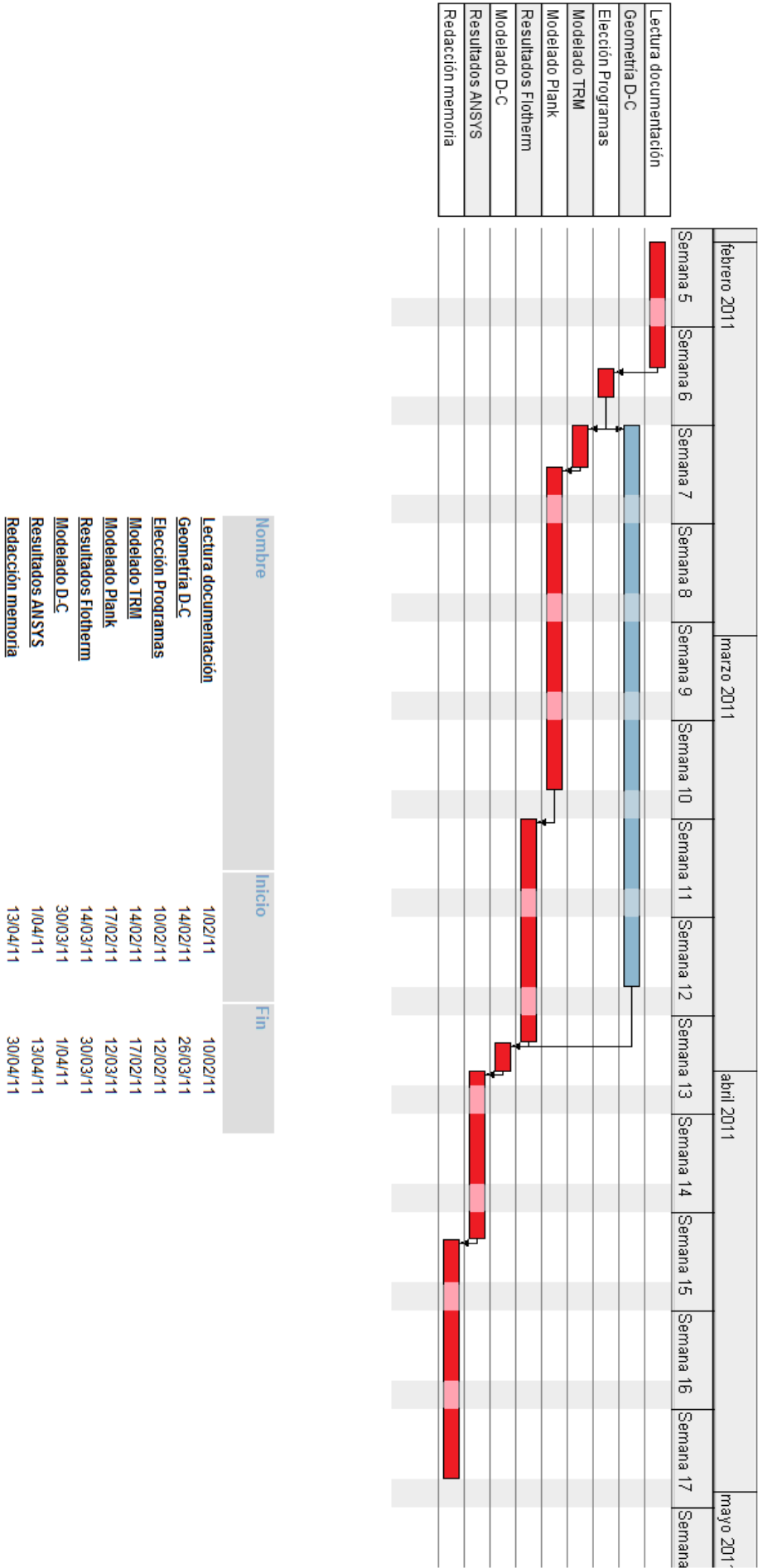
Costes totales del proyecto

Sumando los costes asociados a personal, equipos, licencias y consumibles varios de oficina, obtenemos un coste total de 19.511,48€ tal y como se puede apreciar en la Tabla 34:

Tabla 34: Costes totales

Concepto	Coste [€]
Personal	10.037,73
Licencias y equipos	9.473,75
Total	19.511,48

Diagrama de Gantt del Proyecto





Anexos

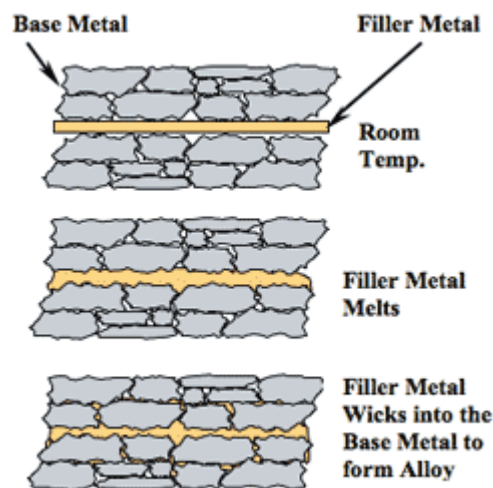


Anexo A, Brazing

El brazing consiste en unir dos metales mediante un proceso de calentamiento a la temperatura adecuada, utilizando en la unión un metal de relleno con una temperatura de fusión inferior a la de los metales que se deben unir, que no intervienen en el proceso de soldadura. En el proceso de brazing, la temperatura de fusión del metal de relleno está por encima de los 450° C, habitualmente entre 600° y 800° C.

El brazing suelda los metales creando una unión metalúrgica entre el metal de aporte y la superficie de los dos metales a ser soldados, es decir, los metales nunca se funden, consiguiendo de esta forma mantener intactas sus propiedades mecánicas y físicas.

La soldadura brazing es un método muy versátil para unir metales. Sus uniones son fuertes y resistentes, tanto si se trata de unir materiales ferrosos como no ferrosos, así como dúctiles, fáciles y rápidas de formar. Este tipo de soldadura es ejecutada relativamente a bajas temperaturas, reduciendo la posibilidad de deformaciones y sobrecalentamientos, además, es económico y altamente adaptable a métodos de automatización. Es posible soldar metales disímiles, incluso de distinta masa y punto de fusión.



Podemos encontrar varios tipos de juntas con soldadura brazing, pero destacan dos de ellas: la junta de tope y la junta de plano.

La junta de tope proporciona un espesor uniforme en la unión y su preparación normalmente es muy simple. Sin embargo, la fuerza de la soldadura de tope es limitada y dependerá, en parte, de la sección del área a soldar.

La soldadura de plano por su parte aporta una gran ventaja frente a la soldadura de tope, ya que proporciona el doble de espesor en la soldadura.



Anexo B, Tablas

A lo largo de este anexo se pueden encontrar las tablas que contienen los datos que forman las gráficas que muestran la evolución de la temperatura en función de la posición relativa del TRM en el Plank. Todos estos datos se encuentran representados gráficamente en su apartado correspondiente del Capítulo 5.

En todas las tablas se puede apreciar en color rojo el valor máximo de temperatura en cada caso y en azul el mínimo.

Tabla A: Temperatura de los casos correspondientes al Plank 16

Plank 16				
Posición TRM	3 Canales	5 Canales	3 C- Recort	5 C- Recort
1	55,11	51,67	56,23	55,23
2	57,47	53,59	59,80	58,64
3	59,19	54,86	61,58	60,10
4	60,52	55,77	61,43	59,41
5	61,55	56,43	60,45	58,02
6	62,34	56,90	60,91	58,24
7	62,93	57,22	61,25	58,28
8	63,34	57,41	61,52	58,27
9	63,58	57,52	61,70	58,23
10	63,68	57,56	61,76	58,15
11	63,61	57,52	61,70	58,03
12	63,38	57,39	61,48	57,84
13	62,96	57,12	61,07	57,52
14	62,33	56,71	60,44	57,08
15	61,42	56,14	59,51	56,48
16	60,21	55,25	58,21	55,57

Tabla B: Temperatura de los casos correspondientes al Plank 24

Plank 24				
Posición TRM	3 Canales	5 Canales	3 Canales Rec.	5 Canales Rec.
1	52,15	50,80	55,89	54,04
2	54,46	52,80	59,55	57,54
3	56,15	54,12	61,36	59,04
4	57,48	55,08	61,15	58,32
5	58,57	55,80	60,09	57,05
6	59,47	56,35	60,57	57,41
7	60,21	56,76	60,96	57,57
8	60,79	57,02	61,30	57,64
9	61,26	57,21	61,60	57,67
10	61,64	57,34	61,88	57,68
11	61,97	57,43	62,13	57,69
12	62,23	57,50	62,36	57,69
13	62,45	57,55	62,54	57,69
14	62,61	57,58	62,69	57,69
15	62,73	57,60	62,80	57,69
16	62,77	57,56	62,85	57,64
17	62,79	57,59	62,86	57,67
18	62,66	57,46	62,74	57,54
19	62,38	57,24	62,47	57,32
20	61,98	56,94	62,07	57,03
21	61,42	56,56	61,52	56,66
22	60,68	56,02	60,78	56,15
23	59,65	55,29	59,76	55,43
24	58,26	54,27	58,38	54,46

Tabla C: Temperatura de los casos correspondientes al Plank 32

Plank 32

Posición TRM	3 Canales	5 Canales	3 canales Rec.	5 Canales Rec.
1	52,34	50,96	55,85	53,83
2	55,15	53,07	59,59	57,44
3	57,22	54,45	61,46	59,06
4	58,87	55,43	61,35	58,57
5	60,21	56,16	60,35	57,32
6	61,33	56,71	60,81	57,71
7	62,26	57,15	61,18	57,93
8	63,06	57,51	61,55	58,12
9	63,75	57,82	61,91	58,30
10	64,33	58,09	62,27	58,46
11	64,79	58,27	62,56	58,57
12	65,12	58,34	62,76	58,59
13	65,35	58,37	62,90	58,56
14	65,52	58,37	63,03	58,53
15	65,67	58,39	63,17	58,51
16	65,79	58,41	63,30	58,51
17	65,89	58,44	63,44	58,52
18	65,97	58,47	63,59	58,55
19	66,04	58,53	63,73	58,59
20	66,07	58,58	63,86	58,64
21	66,07	58,63	63,97	58,68
22	65,95	58,59	63,97	58,64
23	65,72	58,48	63,88	58,52
24	65,39	58,31	63,71	58,35
25	64,99	58,13	63,50	58,17
26	64,52	57,94	63,25	57,98
27	63,96	57,73	62,95	57,78
28	63,28	57,48	62,56	57,53
29	62,43	57,15	62,04	57,21
30	61,35	56,69	61,34	56,75
31	59,96	56,02	60,38	56,09
32	58,14	55,07	59,05	55,15

Tabla D: Temperatura de los casos correspondientes al Plank 36

Plank 36				
Posición TRM	3 canales	5 canales	3 canales Rec.	5 canales Rec.
1	52,58	51,69	55,87	54,01
2	55,04	53,90	59,69	57,67
3	56,80	55,36	61,66	59,39
4	58,18	56,40	61,69	59,02
5	59,30	57,17	60,82	58,01
6	60,24	57,77	61,40	58,52
7	61,05	58,24	61,88	58,83
8	61,77	58,63	62,34	59,08
9	62,41	58,95	62,79	59,30
10	62,95	59,19	63,18	59,47
11	63,41	59,37	63,53	59,59
12	63,82	59,50	63,85	59,68
13	64,15	59,59	64,12	59,74
14	64,37	59,59	64,29	59,71
15	64,55	59,56	64,43	59,66
16	64,71	59,53	64,56	59,62
17	64,86	59,52	64,70	59,60
18	65,02	59,52	64,84	59,59
19	65,17	59,55	64,99	59,61
20	65,33	59,58	65,14	59,64
21	65,49	59,64	65,31	59,69
22	65,65	59,72	65,47	59,77
23	65,79	59,80	65,62	59,84
24	65,87	59,83	65,71	59,87
25	65,84	59,78	65,69	59,81
26	65,78	59,72	65,63	59,74
27	65,66	59,62	65,53	59,64
28	65,46	59,47	65,34	59,48
29	65,19	59,27	65,08	59,28
30	64,86	59,06	64,78	59,07
31	64,49	58,84	64,42	58,84
32	64,04	58,58	63,99	58,58
33	63,45	58,24	63,43	58,23
34	62,68	57,76	62,68	57,75
35	61,66	57,11	61,70	57,09
36	60,28	56,19	60,35	56,17

Tabla E: Temperatura de los casos correspondientes al Plank 40

Plank 40				
Posición TRM	3 canales	5 canales	3 canales Rec.	5 canales Rec.
1	50,79	51,06	55,44	51,94
2	53,01	53,22	59,37	54,57
3	54,54	54,65	61,59	56,12
4	55,71	55,69	62,54	56,49
5	56,66	56,48	60,71	56,75
6	57,42	57,06	60,37	57,38
7	58,04	57,49	60,88	57,77
8	58,56	57,82	61,20	58,05
9	59,03	58,09	61,52	58,29
10	59,47	58,34	61,85	58,51
11	59,89	58,57	62,21	58,72
12	60,27	58,76	62,54	58,89
13	60,56	58,88	62,81	58,99
14	60,81	58,96	63,04	59,06
15	61,01	59,00	63,23	59,09
16	61,12	58,95	63,33	59,03
17	61,20	58,89	63,41	58,96
18	61,28	58,84	63,49	58,91
19	61,38	58,81	63,59	58,87
20	61,49	58,80	63,71	58,86
21	61,61	58,81	63,84	58,87
22	61,74	58,85	63,98	58,90
23	61,89	58,91	64,14	58,96
24	62,05	58,99	64,31	59,04
25	62,20	59,08	64,47	59,12
26	62,30	59,12	64,57	59,15
27	62,33	59,10	64,60	59,13
28	62,31	59,04	64,57	59,07
29	62,24	58,94	64,48	58,96
30	62,11	58,79	64,33	58,81
31	61,95	58,64	64,15	58,65
32	61,78	58,49	63,95	58,50
33	61,60	58,36	63,72	58,36
34	61,36	58,20	63,44	58,20
35	61,03	57,96	63,05	57,96
36	60,59	57,64	62,52	57,64
37	60,01	57,24	61,85	57,23
38	59,29	56,73	61,00	56,71
39	58,34	56,06	59,91	56,04
40	57,00	55,10	58,39	55,07